

**Auslegung, Simulation und Bewertung
von Verkehrsassistenzsystemen
durch die Kopplung mit Verkehrsflussmodellen**

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Jens Langenberg
aus (Geburtsort): Leverkusen

eingereicht am: 08.05.2015
mündliche Prüfung am: 14.09.2015

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer
Prof. Dr.-Ing. Ulrich Seiffert

Veröffentlichungen über den Inhalt der Arbeit sind nur nach vorheriger Genehmigung der Volkswagen AG zugelassen.

Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen AG.

Vorwort

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer, Leiter des Instituts für Verkehrssystemtechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt Braunschweig und Berlin, möchte ich mich für die intensive Betreuung bedanken. Er hat viele wissenschaftliche Anregungen in diese Arbeit eingebracht.

Für die Übernahme des Korreferates danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Ulrich Seiffert, der mich mit seiner Erfahrung und mit klaren Worten immer wieder in die richtige Richtung gelenkt hat.

Darüber hinaus danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Eckehard Schnieder, Leiter des Instituts für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik, für die Übernahme des Vorsitzes.

Dr. Hans-Jürgen Stauss und Dr. Holger Poppe bin ich für die Möglichkeit, meine Arbeit in der Abteilung Umwelt Strategie und Mobilität der Konzernforschung der Volkswagen AG anfertigen zu können, zu Dank verpflichtet. Die konstruktiven Anregungen und das Hinterfragen jeglicher Aspekte haben wesentlich zum Abschluss dieser Arbeit beigetragen.

Weiterhin möchte ich meinen Kollegen Dr. Michael Junge und Florian Kranke für Ihre Unterstützung sowie für die vielen und aufschlussreichen Diskussionen danken.

An dieser Stelle sind auch Dr. Klaus Storm, Dominik Schmidt und Patrick Pascheka zu nennen, welche mir in allen Lebenslagen mit Rat und Tat zur Seite standen.

Besonderer Dank gilt meinen Eltern Rainer und Sigrid Langenberg, die mir meinen Lebensweg erst ermöglicht und mich immer auf jede erdenkliche Art und Weise unterstützt haben. Auch meinem Bruder Nils Langenberg, welcher mir immer zur Seite stand, bin ich zu Dank verpflichtet.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Freundin Katja Riegel für Ihre unendliche Geduld und Unterstützung bedanken.

Jens Langenberg

Kurzfassung

Bisher werden Fahrerassistenzsysteme zur Steigerung des Fahrkomforts verwendet und können im Einzelfall einen Beitrag zur Erhöhung der Verkehrssicherheit leisten. Um den wachsenden Verkehrsproblemen in Form von Staus und dichtem Verkehr zu begegnen, wird in Forschungsarbeiten der Anwendungsbereich von Assistenzsystemen um den Aspekt der Verkehrsflusssteigerung erweitert. Fahrerassistenzsysteme werden zu sogenannten Verkehrsassistenzsystemen. Die verkehrliche Wirkung wird durch das gezielte Anpassen des Fahrverhaltens, basierend auf der Verkehrssituation, erreicht.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird durch die Verknüpfung der Wissenschaftsgebiete Fahrerassistenz und Verkehrsdynamik erstmals ein prognostisches Instrument entwickelt, welches generisch für die simulative Auslegung und Bewertung der verkehrlichen Wirkung von Verkehrsassistenzsystemen nutzbar ist.

Als Grundlage werden dafür zunächst die möglichen Auswirkungen von Assistenzsystemen auf den Verkehrsfluss ermittelt. Basierend auf dem Fundamentaldiagramm des Verkehrs wird anschließend das verkehrliche Optimierungspotenzial hergeleitet. Dabei werden die verkehrlich wirksamen Ausprägungen von Assistenzsystemen entsprechend der Klassifikationen Assistenzstrategie, Assistenzebene und Assistenzkonzept identifiziert.

Darauf aufbauend wird der Regelkreis Fahrer-Fahrzeug um Verkehrsassistenzsysteme erweitert. Dieser wird auf das mikroskopische Verhaltensmodell einer Fahrer-Fahrzeug-Einheit übertragen und eine systematische Modellkopplung zwischen Assistenzsystem- und Verkehrsflussmodell entworfen.

Für die Auslegung und Bewertung von Verkehrsassistenzsystemen wird eine neue Kenngröße unter Berücksichtigung der verkehrlichen Effizienz des individuellen Fahrverhaltens hergeleitet. Anhand dieser räumlich-zeitlichen Straßenbelegung kann das Fahrverhalten eines Assistenzsystems verkehrlich optimiert werden. Weiterhin wird durch die Kenngröße eine Abschätzung der Auswirkungen von Verkehrsassistenzsystemen auf den gesamten Verkehr hinsichtlich des räumlich-zeitlichen Fahrzeugdurchsatzes, des Verkehrsflusses und der Verkehrsdichte auch ohne die Durchführung einer Simulationsuntersuchung ermöglicht.

Für die Anwendung der Modellkopplung und der erarbeiteten Kenngröße wird ein neues Simulationswerkzeug entwickelt. Dieses ermöglicht die Untersuchung der Assistenzsysteme in beliebigen Verkehrsszenarien.

Durch die prototypische Untersuchung eines Ampelphasenassistenzsystems und eines Stauassistenzsystems wird die Funktionsfähigkeit des prognostischen Instruments bestehend aus Modellkopplung, Kenngröße und Simulationswerkzeug nachgewiesen. Die Beispiele bestätigen das verkehrliche Potenzial von Verkehrsassistenzsystemen und zeigen, dass solche Assistenzsysteme zur zielgerichteten Optimierung des Verkehrs genutzt werden sollten.

Abstract

Driver assistance systems are used to increase comfort and, in certain cases, can contribute to improved road safety. To meet the growing traffic problems of congestion and heavy traffic, current research projects extend the scope of assistance systems to aspects of traffic flow. Such driver assistance systems are known as traffic assistance systems. The effect on traffic flow is achieved by the specific adaptation of the driving behaviour based on the traffic situation.

In the present work a prognostic tool is developed, by combining the fields of science about driver assistance and traffic dynamics. This can be used generically for the simulative design and assessment of the traffic impact for traffic assistance systems.

The possible impact of assistance systems on traffic flow is determined as a basis. Based on the fundamental diagram of traffic, the potential for optimization is derived. The effective types of traffic systems are identified related to the classifications strategy, level and concept.

Using the results of the impact analysis the driver-vehicle control loop is combined with traffic assistance systems. This loop is transferred to the microscopic behavior model of a driver-vehicle-unit and a systematic model coupling of models of assistance systems and traffic flow is formed.

A new characteristic is derived for the design and evaluation of traffic assistance systems, taking into account the traffic efficiency of the individual driving behavior. Based on this characteristic the behavior of an assistance system can be optimized for traffic flow. Furthermore, the impact of traffic assistance systems on traffic flow and traffic density can be estimated without conducting a simulation study.

A new simulation tool is developed that makes use of the model coupling and the associated characteristics. This allows the study of the assistance systems in user defined traffic scenarios.

A prototype study of a traffic light assistance system and a congestion assistance system has been undertaken to demonstrate the functioning of the prognostic instrument consisting of the model coupling, the characteristic and the simulation tool. The examples confirm the potential of traffic assistance systems and provide evidence of the benefits of using such assistance systems for optimization of traffic.

Inhalt

1	Einleitung	1
1.1	Motivation, Stand der Wissenschaft und Notwendigkeit	1
1.2	Forschungsprojekte: Ein Überblick	4
1.3	Zielsetzung der Arbeit	6
1.4	Struktur der Arbeit	7
2	Stand der Technik	9
2.1	Modellierung des Verkehrsflusses	9
2.1.1	Klassifikation von Modellierungsansätzen	9
2.1.2	Mikroskopische Verkehrsflussmodellierung	11
2.2	Kenngößen zur Beschreibung des Verkehrs	12
2.2.1	Mikroskopische Verkehrskenngrößen	13
2.2.2	Makroskopische Verkehrskenngrößen	14
2.2.3	Zustandsgleichung und Fundamentaldiagramm des Verkehrs	17
2.3	Simulation des Verkehrsflusses	18
2.3.1	Struktur eines Werkzeugs für die Verkehrsflusssimulation	18
2.3.2	Simulationswerkzeuge	19
2.4	Infrastrukturseitige Maßnahmen zur Verkehrsbeeinflussung	20
2.5	Ebenen der Fahrzeugführung	22
2.6	Klassifikation von Fahrerassistenzsystemen	23
3	Verkehrsbeeinflussung durch Verkehrsassistenzsysteme	27
3.1	Herleitung der Auswirkungen auf die Verkehrskenngrößen	27
3.2	Bestimmung des Optimierungspotenzials im Fundamentaldiagramm	29
3.3	Diskussion	33
4	Kopplung von Verkehrsfluss- mit Assistenzsystemmodellen	35
4.1	Zur Notwendigkeit einer Simulationsbetrachtung	35
4.2	Regelkreis Fahrer-Verkehrsassistenzsystem-Fahrzeug	36
4.2.1	Fahrer-Fahrzeug-Einheit ohne Verkehrsassistenzsystem	37
4.2.2	Fahrer-Fahrzeug-Einheit mit informierendem Verkehrsassistenzsystem	39

4.2.3	Fahrer-Fahrzeug-Einheit mit agierendem Verkehrsassistenzsystem.....	40
4.3	Erweiterung des mikroskopischen Verhaltensmodells	43
4.3.1	Übertragung des Regelkreises Fahrer-Fahrzeug auf das Verhaltensmodell.....	44
4.3.2	Erweiterung des Verhaltensmodells um informierende Assistenzsysteme	45
4.3.3	Erweiterung des Verhaltensmodells um agierende Assistenzsysteme.....	47
4.4	Diskussion	49
5	Verkehrliche Effizienz des individuellen Fahrverhaltens	51
5.1	Herleitung einer Bewertungskenngröße.....	52
5.2	Verkehrliche Optimierung des individuellen Fahrverhaltens	59
5.3	Bewertung der verkehrlichen Effizienz.....	61
5.4	Abschätzung der Auswirkungen auf den Verkehr	62
5.5	Einsatzmöglichkeiten von Verkehrsassistenzsystemen.....	67
5.6	Diskussion	69
6	Simulationswerkzeug für Verkehrsassistenzsysteme	71
6.1	Aufbau des Simulationswerkzeugs.....	72
6.1.1	Struktur der Co-Simulation	73
6.1.2	Ablauf einer Simulationsuntersuchung.....	75
6.2	Modellierung von Fahrer-Fahrzeug-Einheiten	77
6.2.1	Abbildung des mikroskopischen Verhaltensmodells.....	77
6.2.2	Bestimmung der Eingangs- und Führungsgrößen.....	79
6.2.3	Übermittlung der Ausgangs- und Regelgrößen	82
6.3	Simulation infrastrukturseitiger Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen	83
6.4	Diskussion	84
7	Anwendungsbeispiele für Verkehrsassistenzsysteme.....	85
7.1	Ampelphasenassistenzsystem	85
7.1.1	Verkehrliche Problemstellung und betrachtetes Szenario	86
7.1.2	Systemauslegung und verwendete Modelle	88
7.1.3	Simulationsbetrachtung	94
7.1.4	Bewertung der verkehrlichen Auswirkungen.....	95
7.1.5	Validierung in der Praxis	101

7.2	Vorausschauendes Stauassistenzsystem.....	104
7.2.1	Verkehrliche Problemstellung und betrachtetes Szenario	105
7.2.2	Systemauslegung und verwendete Modelle	106
7.2.3	Simulationsbetrachtung	107
7.2.4	Bewertung der verkehrlichen Auswirkungen.....	109
7.3	Diskussion	113
8	Zusammenfassung und weiterer Forschungsbedarf	115
9	Literatur.....	119
10	Anhang.....	133

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1-1: Entwicklung der Jahresfahrleistung, der durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke und der Länge des deutschen Autobahnnetzes nach [BMV14]
- Abbildung 1-2: Kooperativer Ansatz zur Verkehrsoptimierung im Projekt „KOLINE“ nach [BKF11]
- Abbildung 2-1: Mikroskopische Darstellung einer Verkehrssituation und eine beispielhafte Modellgleichung nach [TK10]
- Abbildung 2-2: Makroskopische Darstellung einer Verkehrssituation und eine beispielhafte Modellgleichung nach [TK10]
- Abbildung 2-3: Gegenüberstellung eines realen Verkehrsnetzes mit einer makroskopischen und einer mikroskopischen Netzmodellierung [FFV01]
- Abbildung 2-4: Modell eines Zellularautomaten mit einer beispielhaften Modellgleichung nach [TK10]
- Abbildung 2-5: Unterscheidung zwischen lokaler und momentaner Messwerterhebung, dargestellt in einem Raum-Zeit-Diagramm nach [DET11]
- Abbildung 2-6: Brutto- und Nettokenngrößen nach [TK10]
- Abbildung 2-7: Übersicht der mikroskopischen und makroskopischen lokalen Kenngrößen
- Abbildung 2-8: Übersicht der mikroskopischen und makroskopischen momentanen Kenngrößen
- Abbildung 2-9: Schematische Darstellung des Fundamentaldiagramm des Verkehrs als Verkehrsfluss-Dichte-Diagramm mit der mittleren Geschwindigkeit \bar{v}
- Abbildung 2-10: Aufbau eines Werkzeugs zur Verkehrsflusssimulation nach [DET11]
- Abbildung 2-11: Schematischer Regelkreis für die Signalsteuerung zur Verkehrsbeeinflussung nach [WR06]
- Abbildung 2-12: 3-Ebenen-Modell der Fahrzeugführung nach [DON15]
- Abbildung 2-13: Schematischer Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Straße nach [DIL73]
- Abbildung 2-14: Assistenzebene eines Fahrerassistenzsystems in Abhängigkeit der Assistenzstrategie und des Assistenzkonzeptes nach [WIL04]
- Abbildung 3-1: Verkehrsnetz zur Herleitung der Auswirkungen von Verkehrsassistenzsystemen auf die Verkehrskenngrößen
- Abbildung 3-2: Fundamentaldiagramm aus realen Messdaten [TK10]
- Abbildung 3-3: Ideales Fundamentaldiagramm ohne Berücksichtigung von negativen Wechselwirkungen zwischen Fahrer-Fahrzeug-Einheiten in Abhängigkeit der mittleren Geschwindigkeit \bar{v}_{max} und die Zeitlücke $t_{Zeitlücke}$
- Abbildung 3-4: Verteilung der Nettozeitlücken t_{Netto} für gestauten $v < 60 \text{ kmh}$ und freien Verkehr $v \geq 60 \text{ kmh}$ nach [TK10]

- Abbildung 3-5: Prinzipdarstellung eines Fundamentaldiagramms mit gesteigerter kritischer Verkehrsdichte C_{opt} nach [DET11]
- Abbildung 4-1: Regelkreis Fahrer-Fahrzeug ohne Verkehrsassistenzsystem
- Abbildung 4-2: Regelkreis Fahrer-Fahrzeug mit einem informierenden Verkehrsassistenzsystem
- Abbildung 4-3: Regelkreis Fahrer-Fahrzeug mit einem agierenden Verkehrsassistenzsystem, bei dem der Fahrer eine Führungsaufgabe übernimmt und das Assistenzsystem überwacht
- Abbildung 4-4: Regelkreis Fahrer-Fahrzeug mit einem agierenden Fahrerassistenzsystem, bei dem der Fahrer nur die Überwachungsaufgabe übernimmt
- Abbildung 4-5: Regelkreis Fahrer-Fahrzeug mit einem agierenden Fahrerassistenzsystem ohne Überwachung durch den Fahrer
- Abbildung 4-6: Regelkreis einer Fahrer-Fahrzeug-Einheit ohne Verkehrsassistenzsystem in einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation
- Abbildung 4-7: Regelkreis einer Fahrer-Fahrzeug-Einheit mit einem informierendem Verkehrsassistenzsystem in einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation
- Abbildung 4-8: Regelkreis einer Fahrer-Fahrzeug-Einheit mit einem agierenden Verkehrsassistenzsystem, welches durch den Fahrer überwacht wird, in einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation
- Abbildung 4-9: Regelkreis einer Fahrer-Fahrzeug-Einheit mit einem agierenden Verkehrsassistenzsystem ohne die Überwachung durch den Fahrer in einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation
- Abbildung 5-1: Straßenbelegung einer Fahrer-Fahrzeug-Einheit
- Abbildung 5-2: Berechnung der belegten Straßenfläche anhand von Riemann-Summen während der Durchfahrt eines fixierten Streckenabschnitts
- Abbildung 5-3: Räumlich-zeitlich belegte Straßenfläche F_b für einen fixierten Streckenabschnitt in Abhängigkeit der mittleren Geschwindigkeit \bar{v}
- Abbildung 5-4: Verkehrsfluss q in Abhängigkeit der mittleren lokalen Geschwindigkeit \bar{v}_l
- Abbildung 5-5: Verkehrliche Optimierung des individuellen Fahrverhaltens einer Fahrer-Fahrzeug-Einheit
- Abbildung 5-6: Verkehrliche Effizienzbewertung des individuellen Fahrverhaltens basierend auf dem idealen Fahrverhalten
- Abbildung 5-7: Abschätzung der Auswirkungen eines Verkehrsassistenzsystems auf den räumlich-zeitlichen Fahrzeugdurchsatz
- Abbildung 5-8: Methodische Abschätzung der Auswirkungen auf den mittleren Verkehrsfluss und die mittlere Verkehrsdichte
- Abbildung 5-9: Bereiche des Fundamentaldiagramms zur Identifikation von Einsatzgebieten von Verkehrsassistenzsystemen
- Abbildung 6-1: Grundsätzlicher Aufbau des Co-Simulationswerkzeugs

- Abbildung 6-2: Sequenzdiagramm zum Herstellen der TCP / IP-Verbindung zwischen SUMO und Matlab / Simulink
- Abbildung 6-3: Sequenzdiagramm zum Ablauf der Simulation
- Abbildung 6-4: Sequenzdiagramm zum Beenden der Verbindung
- Abbildung 6-5: Prinzipieller Ablauf einer Simulationsuntersuchung
- Abbildung 6-6: Aufgabenteilung zwischen SUMO und Matlab / Simulink
- Abbildung 6-7: Prinzip der arraybasierten Datenstruktur
- Abbildung 6-8: Eingangsgrößen eines Fahrzeugfolgmodells
- Abbildung 6-9: Eingangsgrößen des Fahrstreifenwechselmodells bezüglich umgebender Fahrer-Fahrzeug-Einheiten nach [TK10]
- Abbildung 6-10: Fahrstreifenindizes in SUMO
- Abbildung 7-1: Annäherungen an eine Lichtsignalanlage im Raum-Zeit-Diagramm mit eingezeichneter Ampelphase, dabei entspricht die jeweilige Fahrzeuggeschwindigkeit der Steigung einer Linie
- Abbildung 7-2: Geschwindigkeitsverläufe $v(t)$ über der Zeit t von Stopps an Lichtsignalanlagen
- Abbildung 7-3: Regelkreis Fahrer-Fahrzeug mit einem agierenden Assistenzsystem ohne Überwachung durch den Fahrer
- Abbildung 7-4: Variation der Verzögerung zum Erreichen der Passiergeschwindigkeit
- Abbildung 7-5: Darstellung der Fahrstrategien ohne Rückstau im Raum-Zeit-Diagramm mit eingezeichneter Ampelphase, dabei entspricht die jeweilige Fahrzeuggeschwindigkeit der Steigung einer Linie
- Abbildung 7-6: SUMO-Verkehrsszenario der Simulationsbetrachtung
- Abbildung 7-7: Relative räumlich-zeitlich belegte Straßenfläche $F_{b,rel}$ der Fahrer-Fahrzeug-Einheiten über der Funkreichweite r_f in Abhängigkeit der minimalen Geschwindigkeit v_{min}
- Abbildung 7-8: Relative räumlich-zeitlich belegte Straßenfläche $F_{b,rel}$ der Fahrer-Fahrzeug-Einheiten nach dem Passieren der Haltelinie über der Funkreichweite r_f in Abhängigkeit der minimalen Geschwindigkeit v_{min}
- Abbildung 7-9: Anzahl der Halte über der Funkreichweite r_f in Abhängigkeit der minimalen Geschwindigkeit v_{min}
- Abbildung 7-10: Relatives Integral der positiven Beschleunigungen $\int a > 0 dt_{rel}$ über der Funkreichweite r_f in Abhängigkeit der minimalen Geschwindigkeit v_{min}
- Abbildung 7-11: Durchschnittliche Verzögerungen a in Realfahrten und simulierten Geschwindigkeitsverläufen über der Relativgeschwindigkeit Δv_p
- Abbildung 7-12: Berechnete Geschwindigkeitsverläufe $v(t)$ basierend auf den durchschnittlichen Verzögerungen aus Realfahrt und Simulation über der Zeit t
- Abbildung 7-13: Vergleich eines realen und eines simulierten Geschwindigkeitsverlaufes $v(t)$ über der Zeit t
- Abbildung 7-14: Geschwindigkeitsverläufe $v(t)$ der Messfahrten über der Zeit t

- Abbildung 7-15: Nummerierung der Fahrer-Fahrzeug-Einheiten
- Abbildung 7-16: Relative räumlich-zeitlich belegte Straßenfläche $F_{b,rel}$ der Fahrer-Fahrzeug-Einheit 10 in Abhängigkeit des Ausstattungsvektors $A_{VAS,V}$
- Abbildung 7-17: Geschwindigkeitsverlauf $v(t)$ der Fahrer-Fahrzeug-Einheit 10 in der ersten Fahrt über der Zeit t in Abhängigkeit des Ausstattungsvektors $A_{VAS,V}$
- Abbildung 7-18: Geschwindigkeitsverlauf $v(t)$ der Fahrer-Fahrzeug-Einheit 10 in der vierten Fahrt über der Zeit t in Abhängigkeit des Ausstattungsvektors $A_{VAS,V}$
- Abbildung 7-19: Verkehrsfluss q in Fahrt 1 über der Zeit t in Abhängigkeit des Ausstattungsvektors $A_{VAS,V}$, basierend auf der von Fahrer-Fahrzeug-Einheit 10 gefahrenen Geschwindigkeit
- Abbildung 7-20: Relatives Integral der positiven Beschleunigungen $\int a > 0 dt_{rel}$ über der Zeit t für die Fahrer-Fahrzeug-Einheit 10 in Abhängigkeit des Ausstattungsvektors $A_{VAS,V}$

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1:	Handlungsebenen der Verkehrssteuerung nach [DET11]
Tabelle 2-1:	Vergleich der am häufig verwendeten Simulationswerkzeuge (+ = erfüllt, o = neutral, - = nicht erfüllt)
Tabelle 2-2:	Klassifikationskriterien für infrastrukturseitige Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen
Tabelle 2-3:	Klassifikation von infrastrukturseitigen Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen
Tabelle 2-4:	Klassifikation von Fahrerassistenzsystemen
Tabelle 2-5:	Klassifikation automatisierter Fahrfunktionen nach [BAS12]
Tabelle 3-1:	Sinnvolle Ausprägungen verkehrsoptimierender Verkehrsassistenzsysteme hinsichtlich der Klassifikationsmöglichkeiten
Tabelle 4-1:	Definition der verwendeten regelungstechnischen Begriffe basierend auf [DIN09] und [ABE07]
Tabelle 4-2:	Physikalische Größen des Regelkreises Fahrer-Fahrzeug, beispielhaft für die Fahrzeuglängsführung
Tabelle 4-3:	Verkehrsbeeinflussende Ausprägungen von Verkehrsassistenzsystemen, zugeordnet zu dem mikroskopischen Verhaltensmodell einer Fahrer-Fahrzeug-Einheit
Tabelle 5-1:	Kriterien für die Steuerung des Straßenverkehrs nach [SCH07]
Tabelle 5-2:	Verwendete Verkehrskenngrößen zur Abschätzung der Auswirkungen auf den Verkehr
Tabelle 5-3:	Erweiterte Kriterien für die Steuerung des Straßenverkehrs
Tabelle 6-1:	Wesentliche Eigenschaften eines Simulationswerkzeugs sowie zugehörige Anforderungen für die Untersuchung von Verkehrsassistenzsystemen
Tabelle 6-2:	Umsetzung der Eigenschaften in Werkzeugen für die mikroskopische Verkehrsfluss- und Fahrerassistenzsystemsimulation
Tabelle 6-3:	Eigenschaften der Co-Simulation
Tabelle 6-4:	C++ Funktionen der Klasse „Socket“
Tabelle 6-5:	Klassen- und Gruppeneinteilung der Traffic-Control-Interface Kommandos
Tabelle 6-6:	Aufbau und Funktionen der S-Function
Tabelle 6-7:	TraCI-Kommandos zur Bestimmung der Eingangsgrößen des mikroskopischen Verhaltensmodells einer Fahrer-Fahrzeug-Einheit (FFE)
Tabelle 6-8:	TraCI-Kommandos zur Übermittlung der Regelgrößen
Tabelle 6-9:	Infrastrukturseitige Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen, klassifiziert nach Adressaten
Tabelle 7-1:	Durchschnittsgeschwindigkeiten des Status Quo v_{SQ} und räumlich-zeitlich belegte Straßenflächen der vier Fahrten für den Status Quo F_b, SQ, v_{SQ} und das ideale Fahren $F_b, ideal, ideal$

Tabelle 7-2:	Parameter und Werte des „Intelligent Driver Model“
Tabelle 7-3:	Vergleich der Durchschnittsgeschwindigkeiten des optimierten v_{opt} und des Status Quo Fahrens v_{SQ} sowie der zugehörigen räumlich-zeitlich belegten Straßenflächen $Fb, optv_{opt}$ bzw. Fb, SQv_{SQ}
Tabelle 7-4:	Variierte Parameter der Simulation
Tabelle 7-5:	Gemessene Funkreichweiten während der Messfahrten
Tabelle 7-6:	Streckenlängen, Durchschnittsgeschwindigkeiten des Status Quo v_{SQ} und räumlich-zeitlich belegte Straßenflächen der vier Fahrten für den Status Quo Fb, SQv_{SQ} und das ideale Fahren $Fb, idealv_{ideal}$
Tabelle 7-7:	Totzeiten des vorausschauenden Stauassistenzsystems
Tabelle 7-8:	Variierte Parameter der Simulation
Tabelle 7-9:	Durchschnittsgeschwindigkeiten v und quasi-lokale räumlich-zeitlich belegte Straßenflächen Fbv der Fahrer-Fahrzeug-Einheit 10 während der ersten Fahrt in Abhängigkeit des Ausstattungsvektors $AVAS, V$

Abkürzungsverzeichnis

ACC	Adaptive Cruise Control
Aktiv	Adaptive und kooperative Technologien für den intelligenten Verkehr
API	Application Interface
AIMSUN	Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
CA	Cellular Automata
CAN	Controller Area Network
COM	Component Object Model
C2C	Car-to-Car(-Kommunikation)
C2X	Car-to-Infrastructure(-Kommunikation)
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DTV	Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke
FAS	Fahrerassistenzsystem
FFE	Fahrer-Fahrzeug-Einheit
FKA	Forschungsgesellschaft für Kraftfahrwesen Aachen
FZG	Fahrzeug
GPL	General Public License
GPS	Global Positioning System
ID	Identifikationsnummer
IDM	Intelligent Driver Model
Invent	Intelligenter Verkehr und nutzergerechte Technik
KOLINE	Kooperative und optimierte Lichtsignalsteuerung in städtischen Netzen
LSA	Lichtsignalanlage
NIV	Netzausgleich Individualverkehr
PELOPS	Programm zur Entwicklung längsdynamischer mikroskopischer Verkehrsprozesse in systemrelevanter Umgebung
PTV	Planung Transport Verkehr AG
SDK	Software Development Kit
SQ	Status Quo
STA	Stauassistent
SUMO	Simulation of Urban Mobility

TCP / IP	Transmission Control Protocol / Internet Protocol
TraCI	Traffic Control Interface
UR:BAN	Urbaner Raum: Benutzergerechte Assistenzsysteme und Netzmanagement
VAS	Verkehrsassistenzsystem
VISSIM	Verkehr in Städten Simulation
VLA	Verkehrsleistungsassistentz
:=	Formelmäßige Definition einer Variablen

Symbolverzeichnis

δ	Beschleunigungsexponent	[—]
P_m	Steigerung der mittleren Verkehrsdichte	[%]
ρ	Verkehrsdichte	[Fzg/km]
ρ_{krit}	kritische Verkehrsdichte	[Fzg/km]
$\rho_{krit,opt}$	optimierte kritische Verkehrsdichte	[Fzg/km]
ρ_{max}	maximale Verkehrsdichte	[Fzg/km]
$\rho_{m,opt}$	mittlere Verkehrsdichte bei optimiertem Fahrverhalten	[Fzg/km]
$\rho_{m,SQ}$	mittlere Verkehrsdichte bei Status Quo Fahrverhalten	[Fzg/km]
τ	Anfahrverzögerung	[s]
A_{id}	Array mit Identifikationsnummern von Fahrer-Fahrzeug-Einheiten	[—]
A_{VAS}	Ausstattungsrate von Fahrer-Fahrzeug-Einheiten mit einem Verkehrsassistenzsystem	[%]
$A_{VAS,V}$	Ausstattungsvektor von Fahrer-Fahrzeug-Einheiten mit einem Verkehrsassistenzsystem	[—]
a	Beschleunigung	[m/s ²]
a_{IDM}	Beschleunigung des Intelligent Driver Models	[m/s ²]
a_i	Untergrenze eines Parameters i	[—]
a_{real}	real gemessene Beschleunigung	[m/s ²]
a_{sim}	simulierte Beschleunigung	[m/s ²]
b	Bremsverzögerung	[m/s ²]
b_i	Obergrenze eines Parameters i	[—]
b_{Fzg}	Breite eines Fahrzeugs	[m]
$b_{Strecke}$	Breite einer betrachteten Strecke	[m]
C	Verkehrskapazität	[Fzg/h]
C_{opt}	optimierte Verkehrskapazität	[Fzg/h]
E_{FF}	Eingangsgrößen eines Fahrzeugfolgmodells	[—]
E_{FSW}	Eingangsgrößen eines Fahrstreifenwechselmodells	[—]
F_b	räumlich-zeitlich belegte Straßenfläche	[m ² s]
$F_{b,rel}$	Reduktion der räumlich-zeitlich belegten Straßenfläche, bezogen auf den Status Quo	[%]
$F_{b,gemischt}$	räumlich-zeitlich belegte Straßenfläche bei Mischverkehr	[m ² s]
$F_{b,ideal}$	räumlich-zeitlich belegte Straßenfläche bei idealem Fahrverhalten	[m ² s]

$F_{b,l\ddot{a}ngs}$	räumlich-zeitliche belegte Straßenfläche in Fahrzeug-Längsrichtung	$[m\ s]$
$F_{b,lok}$	mittlere lokale räumlich-zeitlich belegte Straßenfläche	$[m\ s]$
$F_{b,mom}$	mittlere momentane räumlich-zeitlich belegte Straßenfläche	$[m^2]$
$F_{b,opt}$	räumlich-zeitlich belegte Straßenfläche bei optimiertem Fahrverhalten	$[m^2\ s]$
$F_{b,opt,l\ddot{a}ngs}$	räumlich-zeitlich belegte Straßenfläche in Fahrzeug-Längsrichtung bei optimiertem Fahrverhalten	$[m\ s]$
$F_{b,opt,lok}$	mittlere lokale räumlich-zeitlich belegte Straßenfläche bei optimiertem Fahrverhalten	$[m\ s]$
$F_{b,opt,mom}$	mittlere momentane räumlich-zeitlich belegte Straßenfläche bei optimiertem Fahrverhalten	$[m^2]$
F_{b,P^*}	räumlich-zeitlich belegte Straßenfläche mit dem Parametersatz P^*	$[m^2\ s]$
$F_{b,SQ}$	räumlich-zeitlich belegte Straßenfläche bei Status Quo Fahrverhalten	$[m^2\ s]$
$F_{b,SQ,l\ddot{a}ngs}$	räumlich-zeitliche Straßenbelegung in Fahrzeug-Längsrichtung bei Status Quo Fahrverhalten	$[m\ s]$
$F_{b,SQ,lok}$	mittlere lokale räumlich-zeitlich belegte Straßenfläche bei Status Quo Fahrverhalten	$[m\ s]$
$F_{b,SQ,mom}$	mittlere momentane räumlich-zeitlich belegte Straßenfläche bei Status Quo Fahrverhalten	$[m^2]$
F_{gesamt}	gesamte zur Verfügung stehende räumlich-zeitliche Straßenfläche	$[m^2\ s]$
f_b	belegte Straßenfläche	$[m^2]$
G_B	Befolgungsgenauigkeit	$[\%]$
$G_{B,id}$	Array mit Befolgungsgenauigkeiten	$[-]$
$G_{F,U,y}$	Übertragungsfunktion eines Fahrers zur Bestimmung der Stellgröße für einen überwachenden Regler	$[-]$
$G_{F,w}$	Übertragungsfunktion eines Fahrers zur Bestimmung der Führungsgröße	$[-]$
$G_{F,y}$	Übertragungsfunktion eines Fahrers zur Bestimmung der Stellgröße	$[-]$
G_{Fzg}	Übertragungsfunktion eines Fahrzeugs	$[-]$
$G_{VAS,w}$	Übertragungsfunktion eines Verkehrsassistenzsystems zur Bestimmung der Führungsgröße	$[-]$
$G_{VAS,y}$	Übertragungsfunktion eines Verkehrsassistenzsystems zur Bestimmung der Stellgröße	$[-]$
l_{Fzg}	Länge eines Fahrzeugs	$[m]$
$l_{Strecke}$	Länge eines betrachteten Streckenabschnitts	$[m]$
Δm	Anzahl an Fahrzeugen auf einem Streckenabschnitt	$[-]$
N	Anzahl an Messwerten	$[-]$

$N_{max,gemischt}$	Steigerung des räumlich-zeitlichen Fahrzeugdurchsatzes bei Mischverkehr	[%]
$N_{max,opt}$	Steigerung des räumlich-zeitlichen Fahrzeugdurchsatzes bei optimiertem Fahrverhalten	[%]
Δn	Anzahl an Fahrzeugen in einem Zeitintervall	[–]
n_{Fzg}	Anzahl an Fahrzeugen	[–]
$n_{max,Fzg}$	maximale Anzahl an Fahrzeugen	[–]
$n_{max,gemischt}$	räumlich-zeitlicher Fahrzeugdurchsatz bei Mischverkehr	$[Fzg/(km\ h)]$
$n_{max,opt}$	räumlich-zeitlicher Fahrzeugdurchsatz bei optimiertem Fahrverhalten	$[Fzg/(km\ h)]$
$n_{max,SQ}$	räumlich-zeitlicher Fahrzeugdurchsatz bei Status Quo Fahrverhalten	$[Fzg/(km\ h)]$
P	Leistung	$[W]$
P^*	konkreter Parametersatz	[–]
P_i	Parametersatz i	[–]
p	Position / Ort	[–]
p_i	Parameter i	[–]
Q_{ideal}	Bewertungsquotient basierend auf dem idealen Fahrverhalten	[–]
Q_m	Steigerung des mittleren Verkehrsflusses	[%]
Q_{SQ}	Bewertungsquotient basierend auf dem Status Quo Fahrverhalten	[–]
q	Verkehrsfluss	$[Fzg/h]$
$q_{m,opt}$	mittlerer Verkehrsfluss bei optimiertem Fahrverhalten	$[Fzg/h]$
$q_{m,SQ}$	mittlerer Verkehrsfluss bei Status Quo Fahrverhalten	$[Fzg/h]$
R_B	Befolgungsrate	[–]
$R_{B,id}$	Array mit Befolgungsraten	[–]
r_F	Funkreichweite	$[m]$
r_S	Sensorreichweite	$[m]$
s	Abstand	$[m]$
s^*	Wunschabstand	$[m]$
Δs	Streckenabschnitt	$[m]$
$s_{b,längs}$	Straßenbelegung in Längsrichtung	$[m]$
$s_{b,quer}$	Straßenbelegung in Querrichtung	$[m]$
s_{brutto}	Bruttoabstand	$[m]$
\bar{s}_{brutto}	mittlerer Bruttoabstand	$[m]$
$s_{Haltelinie}$	Abstand zur Haltelinie	$[m]$
s_{hFFE}	Abstand zur der hinterherfahrenden Fahrer-Fahrzeug-Einheit	$[m]$
s_i	Messstelle i	[–]

Δs_l	quasi-lokaler Streckenabschnitt	[m]
$s_{l\ddot{a}ngs}$	Sicherheitsabstand in Längsrichtung	[m]
Δs_m	quasi-momentaner Streckenabschnitt	[m]
s_{netto}	Nettoabstand	[m]
s_{quer}	Sicherheitsabstand in Querrichtung	[m]
$s_{quer,ges}$	gesamter Sicherheitsabstand in Querrichtung	[m]
$s_{Rückstau}$	Abstand zum Ende des Rückstaus	[m]
s_{Start}	Startpunkt	[–]
s_{vFFE}	Abstand zur vorausfahrenden Fahrer-Fahrzeug-Einheit	[m]
s_{zFFE}	Abstand zur Fahrer-Fahrzeug-Einheit auf dem Zielfahrstreifen	[m]
s_{Ziel}	Zielpunkt	[–]
s_0	Stillstandsabstand	[m]
$s_{0,l\ddot{a}ngs}$	Stillstandsabstand in Längsrichtung	[m]
$s_{0,quer}$	Stillstandsabstand in Querrichtung	[m]
\hat{T}	Modalwert der Nettozeitlücken	[s]
t	Zeit	[s]
t^*	fixer Zeitpunkt	[s]
Δt	Zeitintervall	[s]
t_{brutto}	Bruttozeitlücke	[s]
\bar{t}_{brutto}	mittlere Bruttozeitlücke	[s]
t_{Halt}	Haltedauer einer Fahrer-Fahrzeug-Einheit	[s]
t_i	Zeitpunkt beim Passieren der Messstelle i	[s]
Δt_l	quasi-lokaler Zeitabschnitt	[s]
Δt_m	quasi-momentaner Zeitabschnitt	[s]
t_{netto}	Nettozeitlücke	[s]
$t_{Restgrün}$	Phasenrestlaufzeit einer grünen Lichtsignalanlage	[s]
$t_{Restrot}$	Phasenrestlaufzeit einer roten Lichtsignalanlage	[s]
t_{Rot}	Dauer der roten Phase einer Lichtsignalanlage	[s]
$t_{Rückstau}$	Zeit, bis wartender Rückstau angefahren ist	[s]
$t_{Zeitdauer}$	Zeitdauer einer Betrachtung	[s]
$t_{Zeitlücke}$	Zeitlücke	[s]
U	Eingangsgrößen aus der Umwelt in einen Regelkreis	[–]
V_{id}	Array mit Geschwindigkeiten	[–]
v	Geschwindigkeit	[m/s]
\bar{v}	mittlere Geschwindigkeit	[m/s]
Δv	Relativgeschwindigkeit	[m/s]
Δv_p	Differenz zwischen gefahrener und Passiergeschwindigkeit	[m/s]

v_F	Geschwindigkeit eines Fahrers	[m/s]
$v_{Grün}$	Passiergeschwindigkeit bei grüner Lichtsignalanlage	[m/s]
v_{hFFE}	Geschwindigkeit der hinterherfahrenden Fahrer-Fahrzeug-Einheit	[m/s]
v_l	lokale Geschwindigkeit	[m/s]
\bar{v}_l	mittlere lokale Geschwindigkeit	[m/s]
v_m	momentane Geschwindigkeit	[m/s]
\bar{v}_m	mittlere momentane Geschwindigkeit	[m/s]
\bar{v}_{max}	maximale mittlere momentane Geschwindigkeit	[m/s]
v_{min}	minimale Geschwindigkeit	[m/s]
v_{Offset}	Offset einer Geschwindigkeit	[m/s]
\bar{v}_{opt}	optimierte maximale mittlere Geschwindigkeit	[m/s]
\bar{v}_{P^*}	maximale mittlere Geschwindigkeit des Parametersatzes P^*	[m/s]
v_{Rot}	Passiergeschwindigkeit bei roter Lichtsignalanlage	[m/s]
\bar{v}_{SQ}	Durchschnittsgeschwindigkeit des Status Quo Fahrverhalten	[m/s]
v_{VAS}	Geschwindigkeit eines Verkehrsassistenzsystems	[m/s]
v_{vFFE}	Geschwindigkeit der vorausfahrenden Fahrer-Fahrzeug-Einheit	[m/s]
v_{zFFE}	Geschwindigkeit der Fahrer-Fahrzeug-Einheit auf dem Zielfahrbahnstreifen	[m/s]
v_0	Wunschgeschwindigkeit	[m/s]
w	Führungsgröße	[–]
w_F	Führungsgröße eines Fahrers	[–]
w_{FF}	Führungsgröße eines Fahrzeugfolgmodells	[–]
w_{FSW}	Führungsgröße eines Fahrbahnwechselmodells	[–]
w_{VAS}	Führungsgröße eines Verkehrsassistenzsystems	[–]
X_{opt}	prozentualer Anteil von Fahrer-Fahrzeug-Einheiten mit optimiertem Fahrverhalten	[%]
X_{SQ}	prozentualer Anteil von Fahrer-Fahrzeug-Einheiten mit Status Quo Fahrverhalten	[%]
x	Regelgröße	[–]
x_F	Regelgröße eines Fahrers	[–]
x_{max}	obere Akzeptanzschwelle eines Fahrers	[–]
x_{min}	untere Akzeptanzschwelle eines Fahrers	[–]
x_{RW}	Ausgangsgröße eines Routenwahlmodells	[–]
$x_{RW,F}$	Route eines Fahrers	[–]
$x_{RW,VAS}$	Routenempfehlung eines Verkehrsassistenzsystems	[–]
x_{VAS}	Regelgröße eines Verkehrsassistenzsystems	[–]
y	Stellgröße	[–]
y_F	Stellgröße eines Fahrers	[–]

$y_{F,U}$	Stellgröße eines Fahrers als überwachender Regler	[–]
y_{VAS}	Stellgröße eines Verkehrsassistenzsystems	[–]
z	Störgröße	[–]
z_F	Störgröße eines Fahrers	[–]
z_{Fzg}	Störgröße eines Fahrzeugs	[–]

1 Einleitung

In diesem Abschnitt wird die Motivation der vorliegenden Dissertation vorgestellt sowie der aktuelle Stand der Wissenschaft und die wesentlichen Forschungsprojekte auf dem Gebiet der verkehrsoptimierenden Fahrerassistenzsysteme zusammengefasst. Abschließend wird die Zielsetzung dieser Arbeit dargelegt und deren Struktur erläutert.

1.1 Motivation, Stand der Wissenschaft und Notwendigkeit

Individuelle Mobilität ist für die heutige Gesellschaft von zentraler Bedeutung. Die Gründe hierfür sind vielfältig: Eine zunehmende örtliche Differenzierung von Wohnen, Freizeit und Arbeit hat in Deutschland zu einer starken Zunahme des motorisierten Individualverkehrs geführt. Zusätzlich ist der Transitverkehr aufgrund der zentralen Lage Deutschlands in Europa ein bedeutender Verkehrsfaktor.

Erschwerend kommt hinzu, dass die schnell steigende Fahrleistung auf eine langsamer wachsende Infrastruktur trifft. Die Entwicklung der Jahresfahrleistung, der durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke (DTV) sowie der Länge des Autobahnnetzes in Deutschland von 1993 bis 2013 zeigt Abbildung 1-1. Es wird deutlich, dass trotz Straßenneu- und -ausbau im Umfang von 14 % die durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke in dem Betrachtungszeitraum ebenfalls um ca. 14 % zugenommen hat. Somit ist die jährliche Fahrleistung als Produkt des DTV-Wertes, der Netzlänge und der Anzahl an Tagen in einem Jahr in dem oben genannten Betrachtungszeitraum um fast 30 % gestiegen.

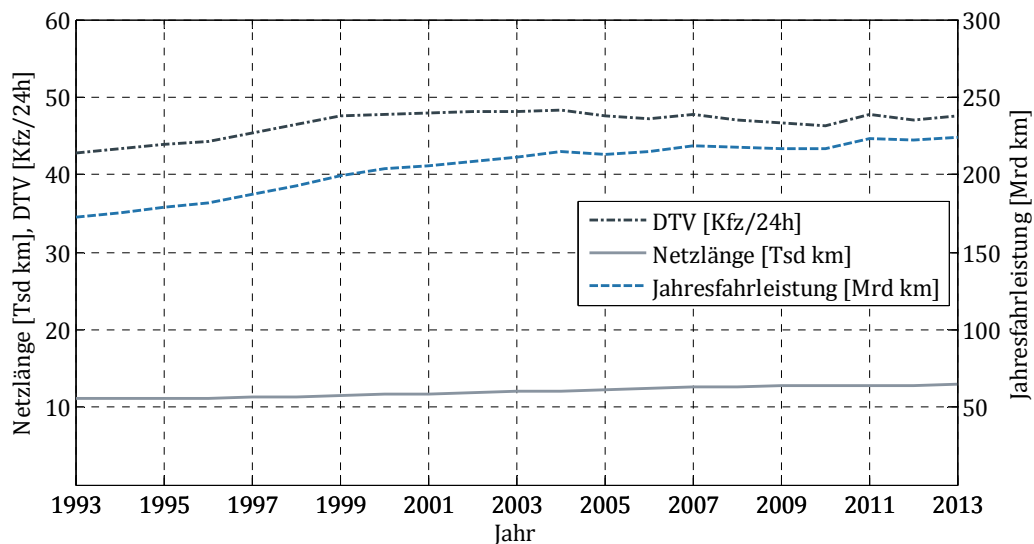


Abbildung 1-1: Entwicklung der Jahresfahrleistung, der durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke und der Länge des deutschen Autobahnnetzes nach [BMV14]

Seit Jahren sind Staus, also stark stockender oder zum Stillstand gekommener Verkehr, über viele Kilometer auf deutschen Autobahnen, Land- und Stadtstraßen zu beobachten. Die wesentlichen negativen Auswirkungen sind Zeitverluste, Unfallgefahren und Umweltbelastungen. Das grundlegende Ziel liegt auch für [LEM14] darin, eine sichere und energieeffizientere Mobilität trotz stetig wachsendem Verkehrsaufkommen zu erreichen. Laut Schätzungen von [AKT15a] wird durch Staus pro Tag ein volkswirtschaftlicher Schaden in Höhe von 280 Millionen Euro verursacht. Daraus lässt sich folglich auch ein ökonomisches Interesse an der Vermeidung von Staus und deren Auswirkungen ableiten.

Nach [LEM11] wird bis zum Jahr 2020 der Anstieg des Pkw-Verkehrs 20 % und der Anstieg des Lkw-Verkehrs 34 % gegenüber dem Jahr 2002 betragen. [BK10] prognostiziert eine Steigerung für den motorisierten Individualverkehr bis zu dem Jahr 2025 um 16 % gegenüber 2004. In [BMV14] wird eine 10-prozentige Steigerung des motorisierten Individualverkehrs bis 2030 im Vergleich zu 2010 prognostiziert. Diese grundsätzliche Entwicklung des wachsenden Verkehrsaufkommens trifft jedoch auf weitgehend leere öffentliche Kassen, es fehlen die finanziellen Mittel für Investitionen in den Straßenbau. [LEM13] nimmt an, dass die Infrastruktur des Jahres 2030 mit dem heutigen Stand vergleichbar ist. Die Folge daraus wäre eine weiter zunehmende Anzahl an Staus, die dem wachsenden Bedarf nach Mobilität entgegen steht und somit vor allem in Industrieländern ein immer größer werdendes Problem darstellt. In einer Untersuchung von [ADA15] betrug die gesamte Staulänge in Deutschland im Jahr 2014 960.000 km, dies entspricht einer Steigerung von mehr als 15 % gegenüber dem Vorjahr. Dieses Problem ist nicht nur in Deutschland existent: Die Erweiterung der Europäischen Union sowie die Globalisierung werden zukünftig auch international zu einem weiter steigenden Personen- und Güterverkehr führen. Nach [MKK06] waren 2006 bereits täglich zehn Prozent des EU-Straßennetzes von Staus betroffen, die Tendenz ist analog zu Deutschland steigend.

Laut einer Studie der Vereinten Nationen [UN02] lebte im Jahr 2000 rund die Hälfte der Menschheit in Städten, wobei weltweit 19 Städte mehr als 10 Millionen Einwohner hatten. Diese Zahl wird sich laut [UN12] bis 2025 auf 37 Städte erhöhen. Dadurch wird die Anzahl an Staus in diesen Ballungsräumen signifikant zunehmen. Für [PWC15] bedingt die zunehmende Verstädterung einen unweigerlich steigenden Transportbedarf von Menschen und Waren. Aufgrund dieser Entwicklung hat das Verkehrsaufkommen aktuell noch nicht sein Maximum erreicht, sondern wird weiter steigen. Bereits [STA01] hat schon betont, dass alleine die Erhaltung der Mobilität eine große Herausforderung darstellt. In Ballungsgebieten kommt es regelmäßig zu Verkehrsinfarkten, die aufgrund der stark begrenzten freien Fläche nicht ausschließlich durch den Straßenneubau gelöst werden können.

Die Voraussetzung für das Entstehen von Staus ist unter anderem ein hohes Verkehrsaufkommen. Dabei wird nach [GL11] und [BKR08] die auf dem Straßenabschnitt zur Verfügung stehende Kapazität durch die Verkehrsnachfrage überschritten. Diese Kapazität wird laut [SCH07] zusätzlich häufig durch Störungen und Behinderungen im Verkehr sowohl auf Stadt- und Landstraßen als auch auf Autobahnen nicht erreicht, wodurch das Staurisiko weiter ansteigt. Zusätzlich erhöht sich laut [ECK11] in diesen Situationen aufgrund der höheren Belastung des Fahrers sein Ressourcenbedarf für die Stabilisierung und Bahnführung des Fahrzeugs. Daraus resultiert in erhöhtem Maß ein individuelles, der Verkehrssituation nicht angemessenes Fahrverhalten. Die Kombination aus hohem Verkehrsaufkommen, vorliegenden

Störungen und unpassendem Fahrverhalten ist nach [TK10] in der Regel der Auslöser für Staus.

[BMW08a] hat in einer Untersuchung für Autobahnen in Deutschland ein hohes Verkehrsaufkommen mit 57 %, Unfälle mit 25 %, Baustellen mit 15 % und Pannen mit 3 % als Ursachen für Verkehrsstaus identifiziert. In einer Analyse für die Autobahnen in Nordrhein-Westfalen, dem bevölkerungsreichsten Bundesland in Deutschland, schätzt [GL11] die Anteile der Stauursachen wie folgt: Baustelle 48 %, hohes Verkehrsaufkommen 40 %, Unfall / Panne 12 %.

Um die Anzahl an Staus und deren negative Auswirkungen zu reduzieren, werden nach [MVI12] Systeme zur Verkehrssteuerung mit dem Ziel einer effizienteren Ausnutzung der existierenden Verkehrswege eingesetzt. Um diese Effizienzsteigerung zu erreichen, werden vier Bereiche unterschieden: Maßnahmen an der innerstädtischen Infrastruktur, an der Infrastruktur von Autobahnen, Verkehrslenkungs- und Fahrerinformationsmaßnahmen sowie ein verbessertes individuelles Fahrverhalten durch den Einsatz von Fahrerassistenzsystemen. Die infrastrukturseitigen Maßnahmen zur Steigerung des Verkehrsflusses durch den Bau neuer oder die Erweiterung bestehender Straßen sind aus Kosten- und Raumgründen häufig nicht realisierbar.

Die Handlungsebenen für die Verkehrslenkung, die zugehörigen Beeinflussungsmöglichkeiten des Verkehrs sowie ihre bisherigen Realisierungen zeigt Tabelle 1-1. Die aktuell genutzte Netz- und Trassenebene ist ausschließlich für langfristige, mehrere Minuten umfassende strategische Fahrempfehlungen zielführend. Beispiele hierfür sind eine über einen längeren Streckenabschnitt geltende Geschwindigkeitsbegrenzung oder die Empfehlung, einen Stau zu umfahren. Die Umsetzung der entsprechenden Beeinflussungsmöglichkeiten ist mit hohem Aufwand und hohen Kosten verbunden.

Handlungsebene	Beeinflussungsmöglichkeit	Realisierung
Netz	Routenführung	Netzbeeinflussungsanlagen
Trasse	Geschwindigkeitsbeschränkung Überholverbote Warnungen (Wetter, Stau, etc.) Zuflussbeschränkungen	Streckenbeeinflussungsanlagen Knotenbeeinflussungsanlagen
Fahrzeug	Geschwindigkeitsverhalten Abstandsverhalten Fahrstreifenwahl Fahrstreifenwechselverhalten	bisher nicht in Serienfahrzeugen zur Verkehrssteuerung genutzt

Tabelle 1-1: Handlungsebenen der Verkehrssteuerung nach [DET11]

Die kurzfristige Anpassung des Fahrverhaltens, zum Beispiel durch ein individuelles Abstandsverhalten, wird bisher nicht zur zielgerichteten Beeinflussung des Verkehrs genutzt. Jedoch ermöglichen intelligente Fahrstrategien einzelner Fahrzeuge nach [VW12] die signifikante Erhöhung der Straßenkapazität. Eine der Dynamik des Straßenverkehrs gerecht werdende Steigerung des Verkehrsflusses kann nach [DET11] nur auf der Ebene einzelner Fahr-

zeuge erreicht werden. Bereits für [VW02] ist die Anpassung des individuellen Fahrverhaltens an die vorliegende Verkehrssituation ein Ansatz zur Steigerung der Leistungsfähigkeit des Straßenverkehrs. Mit Informationen über die umgebenden Fahrzeuge kann laut [DET11] eine verzögerungsfreie, lokal detailliert aufgelöste Verkehrszustandserkennung im Fahrzeug realisiert werden. Darauf aufbauend berechnet ein Fahrerassistenzsystem (FAS) eine für die aktuelle Situation verkehrsoptimale individuelle Fahrstrategie. Eine kommunikationsgestützte und kooperative Interaktion der Verkehrsteilnehmer erlaubt die Beeinflussung von Fahrmanövern beziehungsweise des Verhaltens von Verkehrskollektiven. Daraus können verkehrsoptimale Abläufe resultieren, die sich positiv auf Sicherheit, Umweltschutz und Verkehrseffizienz auswirken [BFN13]. Dadurch wird die Beeinflussung des Verkehrs um die Handlungsebene Fahrzeug erweitert. Entsprechende Fahrerassistenzsysteme werden als Verkehrsassistenzsysteme (VAS) [SR03] bezeichnet.

Aus der Nutzung von Assistenzsystemen zur Steigerung der Verkehrseffizienz ergeben sich neue Anforderungen im Bereich der Auslegung und Bewertung für Verkehrsassistenzsysteme, die bisher noch nicht berücksichtigt werden.

1.2 Forschungsprojekte: Ein Überblick

Erste Ansätze für Verkehrsassistenzsysteme wurden im Rahmen von verschiedenen Förderprojekten erarbeitet. Die Arbeitsinhalte der wesentlichen, in den letzten Jahren geförderten Projekte werden im Folgenden vorgestellt. Alle Projekte wurden dabei kooperativ von Partnern aus Wissenschaft und Industrie bearbeitet.

Das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) in Zusammenarbeit mit dem Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung (BMVBS) von 2001 bis 2005 geförderte Projekt „Invent“ (Intelligenter Verkehr und nutzergerechte Technik) bestand aus den drei Bausteinen „Fahrerassistenz und aktive Sicherheit“, „Verkehrsmanagement in Transport und Logistik“ sowie „Verkehrsmanagement 2010“ [INV15a]. In den Teilprojekten „Netzausgleich Individualverkehr“ (NIV) [INV15b] und „Verkehrsleistungsassistenz“ (VLA) [INV15c] wurde das Ziel der Verkehrsflussoptimierung verfolgt. Dafür erarbeitete Maßnahmen waren unter anderem Routenplanungsdienste, Verkehrsbeeinflussungssysteme oder ein mit Hilfe von Verkehrsassistenzsystemen angepasstes Fahrverhalten auf Autobahnen.

Die von 2006 bis 2010 vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) und dem BMBF geförderte Forschungsinitiative „Aktiv“ (Adaptive und kooperative Technologien für den intelligenten Verkehr) bestand aus den drei Projekten „Verkehrsmanagement“, „aktive Sicherheit“ und „Cooperative Cars“. In dem Projekt „Verkehrsmanagement“ wurden unter anderem eine adaptive Navigation, kooperative Lichtsignalanlagen und störungsadaptives Fahren untersucht [AKT15b]. Das in [KPK10] und [PKS09] beschriebene Verkehrsassistenzsystem „Baustellenlotse“ aus dem Teilprojekt „Störungsadaptives Fahren“ steigerte die Verkehrskapazität und Sicherheit in Baustellenbereichen signifikant durch die Optimierung des Fahrverhaltens einzelner Fahrzeuge [AKT15c].

Die erste großangelegte Feldstudie von modernen Fahrerassistenzsystemen „euroFOT“ wurde zwischen 2008 und 2012 von der Europäischen Kommission gefördert. Diese Studie hat ver-

schiedene Fahrzeugfunktionen bezüglich der Verkehrssicherheit und der Verkehrseffizienz bewertet. Dabei lag der Schwerpunkt auf Fahrerassistenzsystemen, die in realem Verkehr genutzt wurden. Unter Verwendung von Adaptive Cruise Control (ACC) konnten Unfälle und die daraus resultierenden Verkehrsbehinderungen in dem Betrachtungszeitraum nennenswert reduziert werden [EUR15]. Darüber hinaus wurde durch ACC-Systeme die Durchschnittsgeschwindigkeit des Verkehrs gesteigert, die Anzahl an kritischen Abstandsverletzungen zu vorausfahrenden Fahrzeugen sowie die Anzahl an starken Bremsmanövern signifikant reduziert [ETE12].

Das von 2009 bis 2012 bearbeitete und vom BMWi geförderte Projekt „KOLINE“ (Kooperative und optimierte Lichtsignalsteuerung in städtischen Netzen) [KOL15] hat die Erhöhung der Leistungsfähigkeit und Verkehrssicherheit im Straßenverkehr sowie die Verringerung von Fahrzeughalten, Kraftstoffverbrauch und Emissionen an innerstädtischen, von Lichtsignalanlagen geregelten Knotenpunkten, adressiert [VW13]. Der innovative Ansatz dabei war die erstmals realisierte kooperative, gegenseitige Optimierung der Steuerung von Lichtsignalanlagen (LSA) und dem Fahrverhalten der Fahrzeuge. Dieses Optimierungsprinzip wird in Abbildung 1-2 dargestellt. Durch Simulationen unter anderem in [LSM12] wurde nachgewiesen, dass durch eine solche Optimierung Stopps und Umweltbelastungen erheblich reduziert werden können.

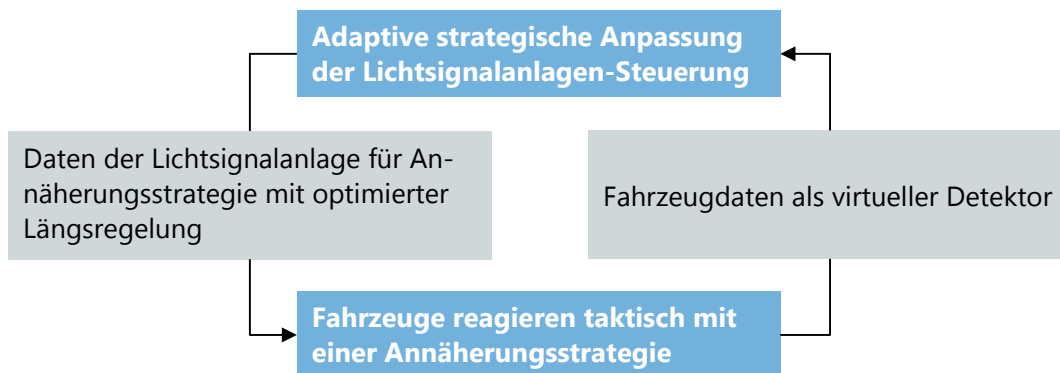


Abbildung 1-2: Kooperativer Ansatz zur Verkehrsoptimierung im Projekt „KOLINE“ nach [BKF11]

Das 2012 gestartete und vom BMWi geförderte Projekt „UR:BAN“ (Urbaner Raum: Benutzer-gerechte Assistenzsysteme und Netzmanagement) besteht aus den drei Themenbereichen „kognitive Assistenz“, „vernetztes Verkehrssystem“ und „Mensch im Verkehr“ [URB15a]. Dabei werden neue Wege für das kooperative Verkehrsmanagement und die strategische Verkehrssteuerung untersucht, um neben der Lenkung von Verkehrsströmen auch die unterschiedlichen Antriebssysteme moderner Fahrzeuge zu berücksichtigen. Das Ziel ist die Optimierung der Verkehrseffizienz sowie die Reduktion von überlasteten Straßen und in Folge dessen die Emissionsminderung im urbanen Raum [URB15b].

1.3 Zielsetzung der Arbeit

Alle bisher abgeschlossenen Forschungsprojekte haben sehr vielversprechende Ergebnisse hinsichtlich einer möglichen Optimierung des Verkehrs durch Verkehrsassistenzsysteme erzielt. Weiterhin wurde nachgewiesen, dass Verkehrsassistenzsysteme einen signifikanten Beitrag zur Steigerung des Verkehrsflusses und zur Reduzierung der negativen Folgen von Staus leisten können. Durch Untersuchungen im Projekt „KOLINE“ wurde jedoch auch festgestellt, dass eine falsche Systemauslegung von Verkehrsassistenzsystemen zu negativen verkehrlichen Auswirkungen führen kann [FWN13], [NIE13].

Jedoch wurden die oben aufgeführten Projekte als Einzelforschungen beauftragt. Dadurch liegen den mit spezifischen Werkzeugen und Methoden erarbeiteten Ergebnissen jeweils verschiedene Ziele beziehungsweise Optimierungsansätze und Anwendungsszenarien zu Grunde. An dieser Stelle knüpft die vorliegende Arbeit an und zeigt allgemein anwendbare Methoden und Werkzeuge für die Auslegung, Simulation und Bewertung von Verkehrsassistenzsystemen.

Die positiven Ergebnisse der durchgeführten Forschungsprojekte zeigen, dass das taktische und damit kurzfristige Fahren durch Verkehrsassistenzsysteme eine wichtige Ergänzung zu den strategischen und somit langfristigen infrastrukturseitigen Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen darstellt. Dadurch wird eine weitere Optimierungsmöglichkeit für den Verkehr geschaffen und eine ganzheitliche Verbesserung auf allen Handlungsebenen ermöglicht.

Dieses übergeordnete Ziel wird basierend auf dem wissenschaftlichen Ansatz der Zusammenführung von Modellen der Assistenzsystem- und mikroskopischen Verkehrsflusssimulation angestrebt. Hierdurch sollen erstmals die folgenden zentralen Fragen zur systematischen Auslegung, Simulation und Bewertung von Verkehrsassistenzsystemen beantwortet werden:

Forschungsfrage 1:

Welche Ausprägungen muss ein Verkehrsassistenzsystem zur Steigerung des Verkehrsflusses haben und in welchen Bereichen des Fundamentaldiagramms des Verkehrs ist eine Optimierung möglich?

Forschungsfrage 2:

Wie können die Auswirkungen von Verkehrsassistenzsystemen bestimmt und wie kann die verkehrliche Effizienz des individuellen Fahrens bewertet werden?

Im Rahmen dieses wissenschaftlichen Vorgehens wird ein neues Modell entwickelt, das aus existierenden mikroskopischen Verkehrsfluss- und neuen Assistenzsystemmodellen besteht. Eine solche systematisch anwendbare Modellkopplung erlaubt die zielgerichtete Untersuchung von Verkehrsassistenzsystemmodellen.

Darüber hinaus wird eine Kenngröße hergeleitet, welche die verkehrliche Effizienz quantifiziert. Verkehrliche Effizienz wird in dieser Arbeit als die räumlich-zeitliche Belegung der Straßenfläche definiert, da jeder Fahrer durch sein individuelles Fahrverhalten Einfluss auf den aktuellen Verkehrsfluss hat. Im Gegensatz zu beispielsweise einer an einem festen Ort montierten infrastrukturseitigen Verkehrsbeeinflussungsanlage kann ein Fahrer sein Fahrverhalten

zu einem beliebigen Zeitpunkt oder Ort anpassen. Dadurch gibt es verkehrlich effizienteres und weniger effizientes Fahrverhalten in Abhängigkeit von Ort und Zeit. Bisherige Verkehrskenngrößen ermöglichen keine räumlich-zeitliche Betrachtung und sind dadurch für die Auslegung und Bewertung von Verkehrsassistenzsystemen nicht ausreichend.

Aufgrund der Verknüpfung von verschiedenen Wissenschaftsgebieten steigt der Komplexitätsgrad für die Simulation von Verkehrsassistenzsystemen gegenüber den alleinigen Assistenzsystem- und Verkehrsflussuntersuchungen stark an. Mit bisher zur Verfügung stehenden Werkzeugen ist die systematische Simulation von Verkehrsassistenzsystemen nicht möglich. Daher ist für die Umsetzung des wissenschaftlichen Ansatzes zusätzlich der Aufbau eines neuen Simulationswerkzeugs notwendig.

Daraus resultieren die folgenden drei Kernaufgaben zur Beantwortung der Forschungsfragen. Diese Aufgaben wurden in der Literatur bisher nicht bearbeitet, stellen jedoch wesentliche Voraussetzungen für die zielgerichtete Optimierung des Verkehrs durch Verkehrsassistenzsysteme dar:

Kernaufgabe 1:

Entwicklung eines Konzeptes für die systematische Kopplung von Verkehrsassistenzsystemmodellen mit dem mikroskopischen Verhaltensmodell eines menschlichen Fahrers.

Kernaufgabe 2:

Herleitung einer Kenngröße zur Auslegung und Bewertung von Verkehrsassistenzsystemen hinsichtlich ihrer verkehrlichen Effizienz.

Kernaufgabe 3:

Entwicklung eines methodisch ausgelegten Werkzeugs für die Umsetzung der Modellkopplung und die systematische Simulation von Verkehrsassistenzsystemen im Verkehrsfluss.

Die erarbeiteten, generischen Lösungen der Forschungsfragen werden zum Abschluss der Arbeit in zwei untersuchten Verkehrsassistenzsystemen angewendet und so deren Praxistauglichkeit nachgewiesen.

Zusammenfassend wird in der vorliegenden Dissertation ein prognostisches Instrument entwickelt, welches generisch für die simulative Auslegung und Bewertung von Verkehrsassistenzsystemen nutzbar ist. Damit wird ein wesentlicher Beitrag für die zielgerichtete und systematische Nutzung des Potenzials von Verkehrsassistenzsystemen zur Steigerung des Verkehrsflusses geleistet.

1.4 Struktur der Arbeit

Das folgende Kapitel 2 fasst mit dem Stand der Technik die Grundlagen für die vorliegende Arbeit zusammen. Dabei werden die Modellierungsarten des Verkehrsflusses sowie die existierenden Kenngrößen zur Beschreibung des Verkehrs erläutert und Werkzeuge für die Verkehrsflusssimulation vorgestellt. Mit den infrastruktureitigen Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen werden die zurzeit angewendeten Strategien zur Optimierung des Verkehrs genannt.

Abschließend werden die Ebenen der Fahrzeugführung beschrieben und Klassifikationsmöglichkeiten für Fahrer- beziehungsweise Verkehrsassistenzsysteme aufgezeigt.

Auf diesen Grundlagen werden in Kapitel 3 mögliche Auswirkungen von Verkehrsassistenzsystemen auf Verkehrskenngrößen abgeleitet. Darüber hinaus wird das verkehrliche Optimierungspotenzial durch ein verändertes individuelles Fahrverhalten basierend auf dem Fundamentaldiagramm des Verkehrs identifiziert.

Zu Beginn von Kapitel 4 wird die Notwendigkeit der Simulation von Verkehrsassistenzsystemen für deren Auslegung und Bewertung begründet. Daran anschließend wird die systematische Kopplung von Verkehrsassistenzsystemmodellen mit dem mikroskopischen Verhaltensmodell eines menschlichen Fahrers erarbeitet. Dafür wird zunächst der Regelkreis Fahrer-Fahrzeug um Assistenzsysteme erweitert und anschließend auf mikroskopische Verkehrsflussmodelle übertragen.

Die verkehrliche Effizienz von Verkehrsassistenzsystemen wird in Kapitel 5 bewertet. Zunächst wird eine neue Kenngröße unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Straßenfläche hergeleitet. Anhand dieser Größe werden Methoden für die Optimierung des Fahrverhaltens und die Abschätzung der Auswirkungen auf den gesamten Verkehr entwickelt. Abschließend wird ein Verfahren zur Identifikation der Einsatzmöglichkeiten von Verkehrsassistenzsystemen dargestellt.

In Kapitel 6 wird das Simulationswerkzeug für die Umsetzung der Modellkopplung und somit für die systematische Untersuchung der Auswirkungen von Verkehrsassistenzsystemen auf den Verkehrsfluss beschrieben und der grundsätzliche Ablauf einer Simulationsuntersuchung skizziert. Weiterhin wird die praktische Modellierung von Fahrer-Fahrzeug-Einheiten mit und ohne Verkehrsassistenzsystem vorgestellt. Abschließend werden die Möglichkeiten des Werkzeugs zur Simulation infrastrukturseitiger Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen zusammengefasst.

Mit einem Ampelphasenassistenzsystem und einem vorausschauendem Stauassistenzsystem werden in Kapitel 7 zwei Beispiele für Verkehrsassistenzsysteme prototypisch untersucht. Dafür werden sowohl die Modellkopplung aus Kapitel 4 als auch die Kenngröße zur Auslegung und Bewertung entsprechend Kapitel 5 sowie das Simulationswerkzeug nach Kapitel 6 verwendet. Dies weist die Praxistauglichkeit der vorliegenden Arbeit nach.

Abschließend werden in Kapitel 8 die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zusammengefasst und weiterer Forschungsbedarf skizziert.

2 Stand der Technik

Um die Grundlagen der vorliegenden Arbeit vorzustellen, werden zu Beginn die verschiedenen Möglichkeiten der Verkehrsflussmodellierung beschrieben, im Anschluss daran werden die Kenngrößen zur Beschreibung des Verkehrs aufgeführt. Darauf folgt die Vorstellung von Werkzeugen für die Simulation des Verkehrsflusses. Im weiteren Verlauf des Kapitels werden die infrastrukturseitigen Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen und damit die bisher verwendeten Möglichkeiten zur Steigerung des Verkehrsflusses genannt. Als Basis für eine systematische Anbindung von Assistenzsystemen an die Verkehrsflusssimulation werden die Ebenen der Fahrzeugführung sowie die Klassifikationsansätze für Fahrerassistenzsysteme dargestellt.

2.1 Modellierung des Verkehrsflusses

Für die Abbildung des Verkehrsflusses existieren verschiedene Modellierungsansätze, deren Klassifikationen zunächst vorgestellt werden. Der für die vorliegende Arbeit verwendete Ansatz der mikroskopischen Verkehrsflussmodellierung wird anschließend detaillierter beschrieben.

2.1.1 Klassifikation von Modellierungsansätzen

Modelle zur Abbildung des Verkehrsflusses lassen sich zum Beispiel anhand ihres inhaltlichen, konzeptionellen oder mathematischen Aufbaus klassifizieren. Dabei ist die inhaltliche Einteilung entsprechend des jeweiligen Detaillierungsgrades in nano-, mikro-, meso- und makroskopischen Verkehrsflussmodelle am gebräuchlichsten. Diese Klassifizierung wird im Folgenden basierend auf [BAU14], [TK10], [SCH07] und [HÖF06] zusammengefasst.

Nanoskopische Verkehrsflussmodelle beschreiben das Verhalten von Fahrer und Fahrzeug in getrennten, detaillierten Modellen. Das Fahrermodell berücksichtigt dessen Stellglieder Brems- und Gaspedal sowie das Lenkrad. In dem Fahrzeugmodell ist beispielsweise ein Motormodell enthalten, der aktuelle Gang kann für die Approximation der momentanen maximalen Beschleunigung verwendet werden. Auch die Auswirkungen der Reifen auf die Fahrdynamik werden berücksichtigt. Aufgrund der detaillierten Modelle und der daraus resultierenden Anforderungen an die Hardware der Simulationscomputer ist eine Untersuchung von vielen Fahrzeugen in großen Verkehrsnetzen nicht möglich.

Im Gegensatz zu der expliziten und detaillierten Berücksichtigung von Fahrer und Fahrzeug wird in mikroskopischen Verkehrsflussmodellen deren Verhalten in einem gemeinsamen Modell beschrieben. Dieses Modell bezeichnet bereits [HEL97] als Fahrer-Fahrzeug-Einheit (FFE). Dabei werden die Fahrzeuglängs- und -querführung in getrennten Modellen abgebildet. Die Modellgleichungen der Längsführung basieren auf dem Abstand und der Relativgeschwindigkeit zu der vorausfahrenden Fahrer-Fahrzeug-Einheit. Ein Fahrstreifenwechsel wird als diskretes Ereignis beschrieben, die Querführung innerhalb des befahrenen Fahrstreifens wird

nicht berücksichtigt. Mikroskopische Modelle bilden einen guten Kompromiss zwischen Detaillierungsgrad und Performance. Sie werden am häufigsten für die Verkehrsflusssimulation verwendet. Aufgrund der Betrachtung von einzelnen Fahrer-Fahrzeug-Einheiten eignen sich mikroskopische Modelle laut [LRB12] und [SCH07] für die Untersuchung der Auswirkungen von Fahrerassistenzsystemen auf den Verkehrsfluss. Abbildung 2-1 zeigt eine mikroskopisch betrachtete Verkehrssituation sowie eine repräsentative Modellgleichung. Diese beschreibt die Abhängigkeit der Beschleunigung a der Fahrer-Fahrzeug-Einheit α von dem Abstand s zu einer vorausfahrenden Fahrer-Fahrzeug-Einheit $\alpha - 1$, deren Geschwindigkeit v_{α} sowie der Relativgeschwindigkeit Δv .

Mikromodell



$$\frac{dv}{dt} = a_{\alpha}(s, v_{\alpha-1}, \Delta v)$$

Abbildung 2-1: Mikroskopische Darstellung einer Verkehrssituation und eine beispielhafte Modellgleichung nach [TK10]

In mesoskopischen Modellen wird der Detaillierungsgrad weiter reduziert. Die Modellgleichungen beschreiben einzelne Fahrer-Fahrzeug-Einheiten nur noch basierend auf makroskopischen Verkehrszusammenhängen, zum Beispiel einer Geschwindigkeits-Dichte-Relation. Direkte Wechselwirkungen zwischen umgebenden Fahrer-Fahrzeug-Einheiten werden in mesoskopischen Modellen nicht berücksichtigt.

Makroskopische Verkehrsflussmodelle sind abstrakt und beschreiben keine einzelnen Fahrer-Fahrzeug-Einheiten mehr. Für die Modellierung des Verkehrs werden Methoden aus der Fluidodynamik angewendet. Anhand von Simulationsuntersuchungen können deshalb nur Aussagen über makroskopische Verkehrskenngrößen wie beispielsweise Verkehrsfluss und -dichte getroffen werden. Abbildung 2-2 zeigt eine makroskopisch betrachtete Verkehrssituation mit einer repräsentativen Modellgleichung. Diese zeigt die sogenannte Kontinuitätsgleichung für einen homogenen Streckenabschnitt ohne beispielsweise Auf- und Abfahrten oder eine Änderung der Fahrstreifenzahl. Die Gleichung basiert auf der Verkehrsdichte ρ abgeleitet nach der Zeit t und der gemittelten Geschwindigkeit \bar{v} , abgeleitet nach dem Ort p .

Makromodell



$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{v})}{\partial p} = 0$$

Abbildung 2-2: Makroskopische Darstellung einer Verkehrssituation und eine beispielhafte Modellgleichung nach [TK10]

In Ergänzung zu diesen vier Modellstrukturen werden in [CHJ02] und [FFV01] hybride Modelle als Kombinationen der Modellierungsansätze verwendet. Beispielsweise wird ein großes Verkehrsnetz in makroskopische und mikroskopische Bereiche unterteilt. Durch die makroskopische Simulation wird der Rechenaufwand reduziert, gleichzeitig aber ein plausibles Eintreten der Fahrer-Fahrzeug-Einheiten in den mikroskopisch betrachteten Verkehrsbereich gewährleistet. Jedoch sind nur in diesem Bereich detaillierte Aussagen über den Verkehr möglich. Die Unterschiede in der Modellierungsgenauigkeit des Verkehrsnetzes zeigt Abbildung 2-3.

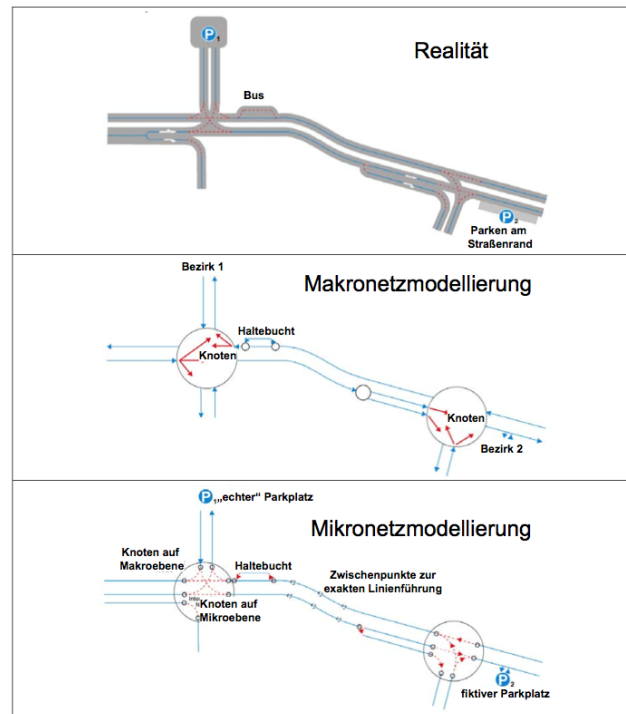


Abbildung 2-3: Gegenüberstellung eines realen Verkehrsnetzes mit einer makroskopischen und einer mikroskopischen Netzmodellierung [FFV01]

2.1.2 Mikroskopische Verkehrsflussmodellierung

Die Modellklasse der mikroskopischen Verkehrsflussmodellierung wird in mehreren Anwendungsgebieten verwendet. Eines davon ist die Modellierung des Einflusses von Fahrerassistenzsystemen auf den Verkehr. Mit der steigenden Verbreitung von Assistenzsystemen mit aktivem Regeleingriff wie einer Adaptive Cruise Control (ACC) gewinnt diese Betrachtung zunehmend an Bedeutung. Ein weiteres Anwendungsgebiet ist die mögliche Untersuchung einer heterogenen Verkehrszusammensetzung, beispielsweise aufgrund von Tempolimits oder Überholverbieten für Lastkraftwagen. Weiterhin kann das menschliche Fahrverhalten unter Berücksichtigung von Schätzfehlern, Reaktionszeiten, Unaufmerksamkeit und Multiantizipation mit mikroskopischen Verkehrsflussmodellen untersucht werden.

Mikroskopische Verkehrsflussmodelle beschreiben einzelne Fahrer-Fahrzeug-Einheiten, die in einer Gesamtbetrachtung den Verkehrsfluss ergeben. Die Reaktion eines Fahrers auf sein Verkehrsumfeld wird anhand der Manöver Beschleunigung, Verzögerung und Wechsel des befahrenen Fahrstreifens beschrieben. Das mikroskopische Verhaltensmodell einer Fahrer-Fahrzeug-Einheit besteht dementsprechend aus einem Fahrzeugfolgemodell, einem Fahrstreifenwechselmodell und einem Routenwahlmodell.

Nach [TK10] und [BZBP09] werden mikroskopische Fahrzeugfolgemodelle mit Hilfe von gewöhnlichen Differentialgleichungen beschrieben. Die kontinuierlichen Zustandsgrößen Ort und Geschwindigkeit sind nur von der Zeit abhängig. Fahrstreifenwechsel werden mikroskopisch als diskrete Zustände kontinuierlich über der Zeit betrachtet. Die Berechnungsmodelle für die Routenauswahl einer Fahrer-Fahrzeug-Einheit werden entweder statisch vor Beginn

der Simulation angewendet und oder die zu fahrende Route wird während einer laufenden Untersuchung beispielsweise aufgrund von Informationen über die Verkehrslage aktualisiert.

Um den realen Verkehrsfluss valide abzubilden, erweitert [TK10] die mikroskopischen Modellgleichungen um Zufallsterme. Dadurch werden Aspekte modelliert, welche nicht messbar oder auch in der Realität zufällig sind. Ein Verrauschen der Eingangsgrößen bildet die menschliche Unvollkommenheit in der Wahrnehmung ab. Durch die Addition eines Rauschanteils auf die Modellausgangsgröße Beschleunigung wird das nicht perfekte Fahren eines Fahrers modelliert. Neben der validen Abbildung des menschlichen Fahrens kann mit Zufallstermen auch das simulierte Verkehrsumfeld an die Realität angepasst werden. Hierzu werden die Verkehrszuflüsse, die Verkehrszusammensetzung oder die Routenwahl mit stochastischen Anteilen kombiniert.

Neben der Unterscheidung zwischen deterministischen Modellen ohne Zufallskomponenten und stochastischen Modellen mit Zufallsanteilen wird in [DET11] differenziert, ob mikroskopische Modelle homogenen Verkehr abbilden oder die Darstellung einer Intra- und Interdrivervariabilität ermöglichen. Die Intradrivervariabilität beschreibt nach [HLHZ09] die Änderung des Fahrverhaltens eines Fahrers über der Zeit, zum Beispiel in Stausituationen. Die Interdrivervariabilität beschreibt das unterschiedliche Verhalten verschiedener Fahrer.

Eine Sonderform von mikroskopischen Verkehrsflussmodellen sind die in Abbildung 2-4 dargestellten Zellularautomaten (Cellular Automata, CA), welche ursprünglich durch [NS92] und [SSN92] eingeführt wurden. Hier liegen alle Größen als diskrete Werte vor, der Ort ist in Zellen fester Länge unterteilt und die Zeit wird in festen Zeitschritten aktualisiert. Der Zustand jeder Zelle ist entweder frei oder belegt. Die gezeigte repräsentative Modellgleichung beschreibt die Position p eines Fahrzeuges zu einem kommenden Zeitpunkt $(t + 1)$ in Abhängigkeit der Position und der Geschwindigkeit v des vorherigen Zeitpunktes t .

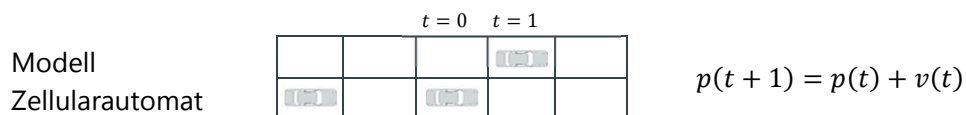


Abbildung 2-4: Modell eines Zellularautomaten mit einer beispielhaften Modellgleichung nach [TK10]

2.2 Kenngrößen zur Beschreibung des Verkehrs

Für die Beschreibung des Verkehrs wird ebenfalls zwischen mikroskopischen und makroskopischen Verkehrskenngrößen unterschieden. Weiterhin wird hinsichtlich momentaner und lokaler Messwerterhebung differenziert, den Unterschied zeigt Abbildung 2-5 in einem Raum-Zeit-Diagramm. Die abgebildeten Linien beschreiben den zurückgelegten Weg s einzelner Fahrer-Fahrzeug-Einheiten in Abhängigkeit der Zeit t . Momentane Daten beschreiben die Messwerterhebung über einen Zeitraum von wenigen Sekunden auf einem längeren Streckenabschnitt Δs . Lokale Daten werden über einen Bereich von wenigen Metern während einer längeren Zeitspanne Δt gemessen.

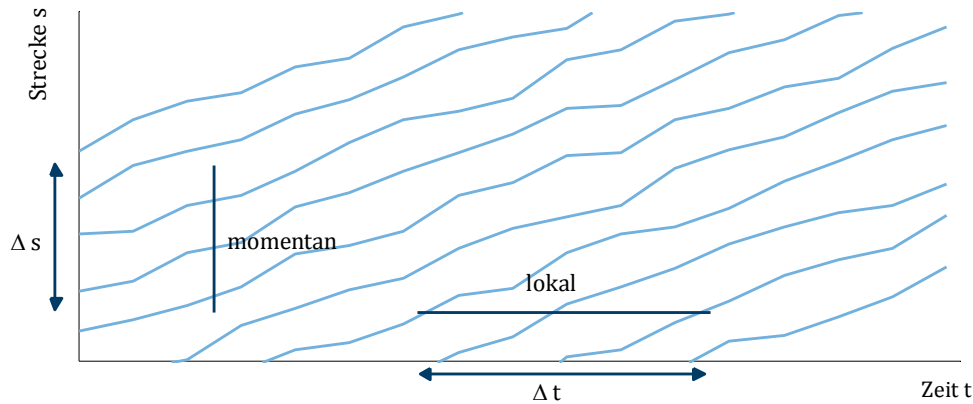


Abbildung 2-5: Unterscheidung zwischen lokaler und momentaner Messwerterhebung, dargestellt in einem Raum-Zeit-Diagramm nach [DET11]

Mikroskopische Größen beschreiben den Verkehr entsprechend Abschnitt 2.1 für einzelne Fahrer-Fahrzeug-Einheiten. Für makroskopische Kenngrößen erfolgt laut [HÖF06] und [TRA06] eine räumliche, zeitliche oder räumlich-zeitliche Aggregation der mikroskopischen Größen.

2.2.1 Mikroskopische Verkehrskenngrößen

In [SL11], [HÖF06], [TRA06], [KÜH04] und [HEL97] wird die Beschreibung des Verkehrszustandes anhand von mikroskopischen Kenngrößen für die verkehrliche Analyse des Fahrverhaltens einzelner Fahrer-Fahrzeug-Einheiten und deren Wechselwirkungen mit dem umgebenden Verkehr vorgenommen. Die dabei wichtigsten Kenngrößen sind die Geschwindigkeit, die Zeitlücke und der Abstand zur vorausfahrenden Fahrer-Fahrzeug-Einheit.

In Abhängigkeit der Detektionsart wird entsprechend obiger Beschreibung zwischen einer lokalen oder momentanen Geschwindigkeit unterschieden. Die lokale Geschwindigkeit v_l wird durch das Verhältnis der Länge eines kurzen und dadurch näherungsweise lokalen Streckenabschnitts Δs_l und der Dauer der Überfahrt Δt_l bestimmt:

$$\begin{array}{ll} \text{lokale} & v_l = \frac{\Delta s_l}{\Delta t_l} \\ \text{Geschwindigkeit} & \end{array} \quad \text{Gleichung 2-1}$$

Die momentane Geschwindigkeit v_m berechnet sich durch das inverse Verhältnis eines kurzen und dadurch quasi-momentanen Zeitabschnitts Δt_m und dem in dieser Zeit zurückgelegten Weg Δs_m :

$$\begin{array}{ll} \text{momentane} & v_m = \frac{\Delta s_m}{\Delta t_m} \\ \text{Geschwindigkeit} & \end{array} \quad \text{Gleichung 2-2}$$

Die Zeitlücke und der Abstand (Weglücke) zu einer vorausfahrenden Fahrer-Fahrzeug-Einheit werden als Brutto- oder Nettogröße angegeben, den Unterschied zeigt Abbildung 2-6. Die

betrachtete Fahrer-Fahrzeug-Einheit wird mit dem Index α , die vorausfahrende Einheit mit dem Index $\alpha - 1$ bezeichnet.

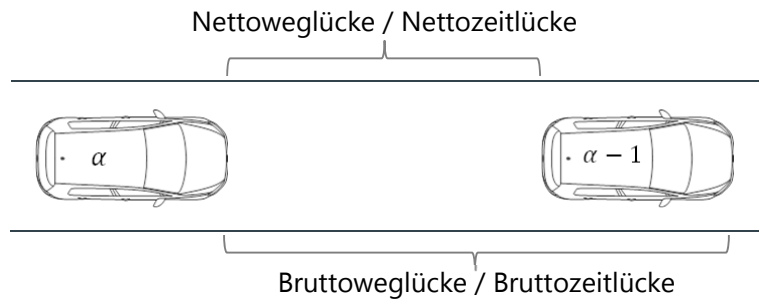


Abbildung 2-6: Brutto- und Nettokenngrößen nach [TK10]

Die Bruttozeitlücke wird nach

$$\text{Bruttozeitlücke} \quad t_{brutto} := t_{\alpha} - t_{\alpha-1} \quad \text{Gleichung 2-3}$$

berechnet, der Bruttoabstand entsprechend

$$\text{Bruttoabstand} \quad s_{brutto} := v_{\alpha-1} \cdot t_{brutto}. \quad \text{Gleichung 2-4}$$

Die Nettogrößen werden mit

$$\text{Nettozeitlücke} \quad t_{netto} := \Delta t_{\alpha} - \frac{v_{\alpha-1}}{l_{Fzg, \alpha-1}} \quad \text{Gleichung 2-5}$$

und

$$\text{Nettoabstand} \quad s_{netto} := v_{\alpha-1} \cdot t_{netto} \quad \text{Gleichung 2-6}$$

bestimmt, dabei beschreibt l_{Fzg} die Länge und v die Geschwindigkeit einer Fahrer-Fahrzeug-Einheit.

2.2.2 Makroskopische Verkehrskenngrößen

Für die Verkehrssteuerung sind die makroskopischen Verkehrskenngrößen von Bedeutung, diese resultieren aus der Betrachtung vieler Fahrer-Fahrzeug-Einheiten. Nach [SCH07], [TRA06] und [KÜH05] sind die wesentlichen Größen der Verkehrsfluss sowie die Verkehrsdichte und die mittleren Geschwindigkeiten, die mittleren Zeitlücken sowie die mittleren Abstände.

Der Verkehrsfluss q beschreibt die Anzahl von Fahrzeugen Δn , die einen lokalen Querschnitt innerhalb eines festen Zeitintervalls Δt überfahren:

Verkehrsfluss $q := \frac{\Delta n}{\Delta t}.$ Gleichung 2-7

Dabei wird unter durch [KÜH05] und [HBS01] der maximale Verkehrsfluss auf einem Straßenquerschnitt als die Verkehrskapazität definiert.

Die Verkehrsdichte ρ beschreibt die Anzahl an Fahrzeugen Δm , die sich zu einem festen Zeitpunkt auf einem festgelegten Streckenabschnitt Δs befinden:

Verkehrsdichte $\rho := \frac{\Delta m}{\Delta s}.$ Gleichung 2-8

Der Unterschied zwischen Δn und Δm liegt in der lokalen beziehungsweise momentanen Betrachtung. Für die Umrechnung zwischen lokalen und momentanen Verkehrskenngrößen wird auf [SL11] und [HÖF06] verwiesen.

Die mittlere lokale Geschwindigkeit \bar{v}_l des Verkehrs wird als Mittelwert der lokalen Geschwindigkeiten aller Fahrer-Fahrzeug-Einheiten berechnet. Dabei beschreibt N die Anzahl der Messwerte und $v_{l,i}$ die lokale Geschwindigkeit einer Fahrer-Fahrzeug-Einheit i :

mittlere lokale Geschwindigkeit $\bar{v}_l := \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_{l,i}.$ Gleichung 2-9

Für die mittlere momentane Geschwindigkeit \bar{v}_m gilt mit der momentanen Geschwindigkeit $v_{m,i}$ einer Fahrer-Fahrzeug-Einheit i analog:

mittlere momentane Geschwindigkeit $\bar{v}_m := \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_{m,i}.$ Gleichung 2-10

Die durchschnittliche Zeitlücke zwischen zwei Fahrer-Fahrzeug-Einheiten beschreibt die mittlere Zeitlücke

mittlere Bruttozeitlücke $\bar{t}_{brutto} := \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i = \frac{1}{q},$ Gleichung 2-11

analog gibt der mittlere Abstand die durchschnittliche Weglücke

mittlerer Bruttobstand $\bar{s}_{brutto} := \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s_i = \frac{1}{\rho}$ Gleichung 2-12

an. Beide makroskopischen Verkehrskenngrößen werden als arithmetisches Mittel aus den Einzelzeitlücken und -abständen berechnet. Die mittlere Bruttozeitlücke entspricht dem

Kehrwert des Verkehrsflusses und der mittlere Bruttoabstand dem Kehrwert der Verkehrsdichte.

Abbildung 2-7 fasst die vorgestellten lokalen Verkehrskenngrößen zusammen und ordnet sie den verschiedenen Modellierungsansätzen zu, analog zeigt Abbildung 2-8 die momentanen Kenngrößen.

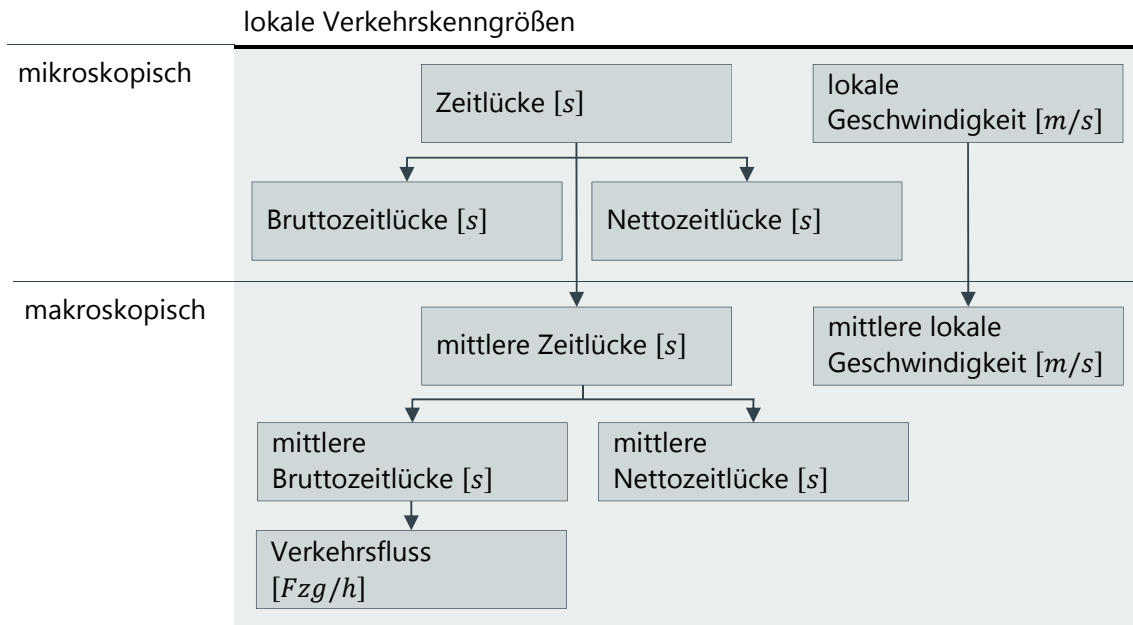


Abbildung 2-7: Übersicht der mikroskopischen und makroskopischen lokalen Kenngrößen

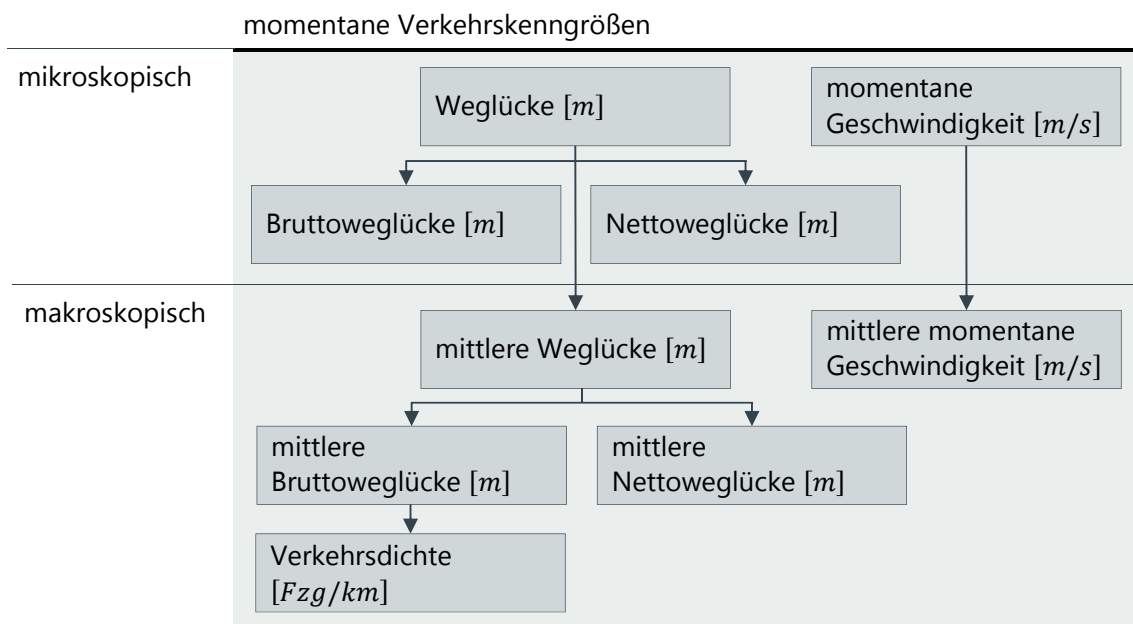


Abbildung 2-8: Übersicht der mikroskopischen und makroskopischen momentanen Kenngrößen

2.2.3 Zustandsgleichung und Fundamentaldiagramm des Verkehrs

Die Zustandsgleichung des Verkehrs beschreibt die Beziehung zwischen dem Verkehrsfluss, der Verkehrsdichte und der mittleren momentanen Geschwindigkeit:

Zustandsgleichung
des Verkehrs

$$q = \bar{v}_m \cdot \rho$$

Gleichung 2-13

Diese Verknüpfung ist nach [SL11] und [TK10] nur bei homogenem, stationärem und sich im Gleichgewicht befindlichem Verkehrsfluss gültig. Eine korrekte mathematische Beschreibung ist über räumlich-zeitliche Verkehrskenngrößen möglich, vergleiche [SL11] und [HÖF06].

Die häufigste Darstellung der Zustandsgleichung ist das in Abbildung 2-9 gezeigte Verkehrsfluss-Verkehrsdichte-Diagramm, welches als Fundamentaldiagramm des Verkehrs bezeichnet wird. Aus dem Ursprung steigt der Verkehrsfluss mit zunehmender Verkehrsdichte. In dem Schwellwert der Dichte ρ_{krit} erreicht der Verkehrsfluss mit der Verkehrskapazität C sein Maximum. Ab diesem Punkt entsteht aufgrund der zunehmenden Wechselwirkungen zwischen einzelnen Fahrer-Fahrzeug-Einheiten eine instabile Verkehrslage, wodurch der Verkehrsfluss wieder sinkt. Die maximale Verkehrsdichte wird im Stillstand erreicht. Da sich Fahrer-Fahrzeug-Einheiten im Stillstand nicht bewegen, ist der Verkehrsfluss Null.

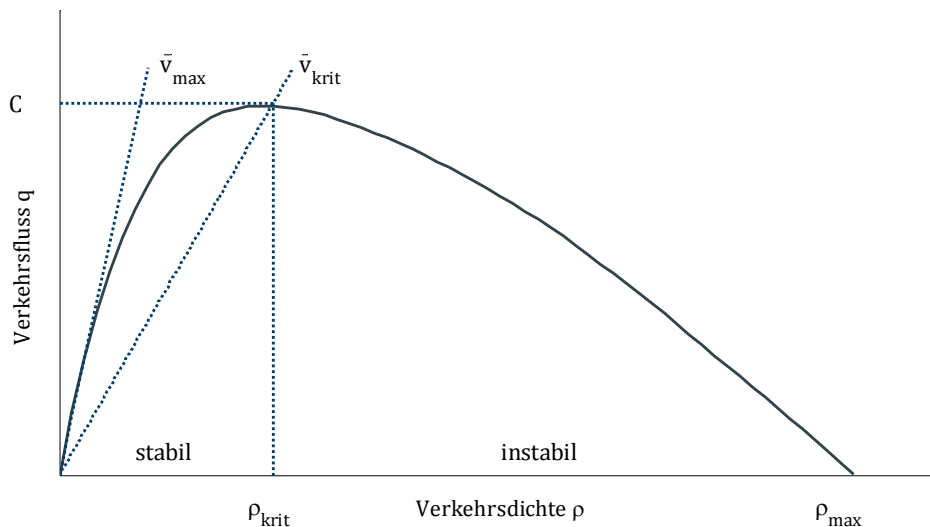


Abbildung 2-9: Schematische Darstellung des Fundamentaldiagramm des Verkehrs als Verkehrsfluss-Dichte-Diagramm mit der mittleren Geschwindigkeit \bar{v}

Aus der Zustandsgleichung des Verkehrs folgt die mittlere momentane Geschwindigkeit \bar{v}_m als Steigung einer Geraden durch den Ursprung und einen Punkt auf dem Verkehrsfluss-Dichte-Diagramm. Dementsprechend beschreiben \bar{v}_{max} die maximale und \bar{v}_{krit} die kritische mittlere momentane Geschwindigkeit.

Im Bereich der instabilen Verkehrslage ist in realen Messdaten eine große Varianz des Verkehrsflusses bei gleicher Verkehrsdichte zu beobachten, es existiert kein messbarer Zusam-

menhang. Messungen zeigen eine Übereinstimmung von Realdaten mit diesem theoretischen Modell bis zur kritischen Verkehrsdichte, darüber nehmen die Abweichungen im instabilen Bereich laut [HÖF06], [KER04] und [HEL97] zu. Gründe hierfür sind ein sich nicht im Gleichgewicht befindender Verkehr, ein räumlich inhomogener Verkehrsfluss oder systematische Messfehler.

Zur bestmöglichen Auslastung eines Straßenabschnitts ist nach [BZBP09] für Verkehrsplaner insbesondere die kritische Dichte ρ_{krit} ein wichtiges Optimierungskriterium.

2.3 Simulation des Verkehrsflusses

Die Modelle und Werkzeuge der Verkehrsflusssimulation wurden bisher hauptsächlich für die Untersuchung der Auswirkungen von straßenbaulichen Veränderungen auf den Verkehr verwendet. Durch die zunehmende Rechenleistung werden sie mittlerweile auch für die Verkehrsprognose in Verkehrsrechnerzentralen und die Steuerung von infrastrukturseitigen Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen verwendet.

Neben Werkzeugen für die Verkehrsflusssimulation existieren beispielsweise mit [DYN15] und [VTD15] sowie [NEU12] Tools zur detaillierten Untersuchung von Fahrerassistenzsystemen. Diese bilden sowohl die Fahrzeugsensorik als auch die -umgebung detailliert ab. Weiterhin werden bereits in [MSK09] Hardware-in-the-Loop-Simulatoren für vorausschauende Fahrerassistenzsysteme genutzt. Aufgrund der umfangreichen Modellierung von einzelnen Fahrzeugen und der daraus resultierenden Anforderungen an die Rechenleistung sind solche Werkzeuge jedoch nicht für die Untersuchung von großen Verkehrsszenarien mit vielen Fahrer-Fahrzeug-Einheiten geeignet.

2.3.1 Struktur eines Werkzeugs für die Verkehrsflusssimulation

Die grundsätzliche Struktur eines Werkzeugs für die Verkehrsflusssimulation wird in Abbildung 2-10 veranschaulicht. Den Kern bildet ein Simulationsmodell, welches aus einem Netzmodell zur Abbildung der Verkehrsinfrastruktur, einem Verkehrsnachfragemodell zur Abbildung der Verkehrsbelastung und dem Verhaltensmodell der Fahrer-Fahrzeug-Einheiten besteht. Dieses Verhaltensmodell besteht aus einem Fahrzeugfolge-, einem Fahrstreifenwechsel- und einem Routenwahlmodell. Darüber hinaus besitzt ein Simulationswerkzeug eine Visualisierung, Prozesse zum Datenim- und -export sowie Auswertungsmethoden.

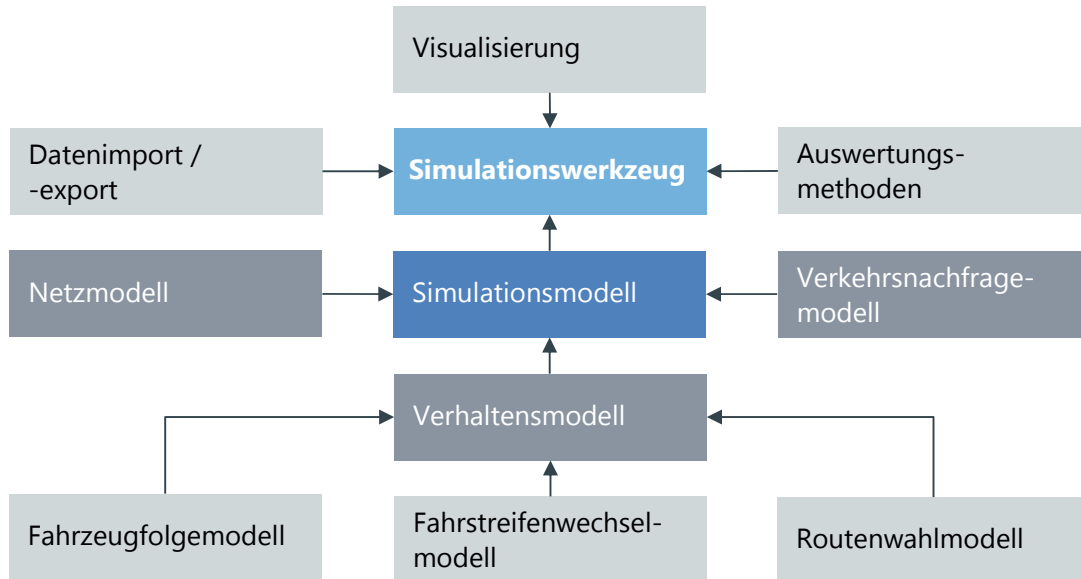


Abbildung 2-10: Aufbau eines Werkzeugs zur Verkehrsflusssimulation nach [DET11]

2.3.2 Simulationswerkzeuge

Es existiert eine Vielzahl an Werkzeugen für mikroskopische Verkehrsflusssimulationen. Im Folgenden und in Tabelle 2-1 werden die nach [BAU14] und [DET11] am häufigsten verwendeten Tools in alphabetischer Reihenfolge zusammengefasst vorgestellt. Weitere Gegenüberstellungen von Simulationswerkzeugen sind darüber hinaus beispielsweise in [ERL07] und [PAV07] enthalten.

AIMSUN (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks) [TSS15] [TSS09a] ist ein kommerzielles Simulationswerkzeug, welches neben der mikroskopischen auch eine meso- und makroskopische Simulation des Verkehrs ermöglicht. Um Aussagen über die Umweltbelastungen simulierter Fahrer-Fahrzeug-Einheiten zu treffen, können den einzelnen Fahrzeugen Angaben zu Verbrauch und Schadstoffemissionen zugeordnet werden. Neben Fahrzeugen ist es auch möglich, Fußgänger in der Simulation abzubilden. Durch ein separat erhältliches Application Interface (API) [TSS09b] kann von einer externen Anwendung auf die Informationen einer laufenden Simulation zugegriffen werden. Mit Hilfe des Software Development Kit (SDK) [TSS15] kann das Verhaltensmodell einer Fahrer-Fahrzeug-Einheit durch eigene Fahrzeugfolge- und Fahrstreifenwechselmodelle ersetzt werden.

PELOPS (Programm zur Entwicklung längsdynamischer mikroskopischer Verkehrsprozesse in systemrelevanter Umgebung) [FKA15] [FKA07] wurde von der Forschungsgesellschaft für Kraftfahrwesen Aachen (FKA) zusammen mit der BMW AG entwickelt und wird seitdem von der FKA kommerziell vertrieben. Das Simulationswerkzeug basiert auf einer nanoskopischen Abbildung von Fahrer, Fahrzeug und Umwelt. Diese werden getrennt voneinander simuliert und über Schnittstellen zusammengeführt. PELOPS bietet die Möglichkeit, die verwendeten Simulationsmodelle durch eigene Modelle zu ersetzen. Es existiert ein Interface zu Mat-

lab / Simulink [Chr10], welches die direkte Anbindung beispielsweise von Fahrerassistenzsystemen ermöglicht [BRE04], [CBB04], [WEI00]. Weiterhin verfügt das Werkzeug über eine serielle Schnittstelle und ein Controller Area Network (CAN)-Bus Interface zur Integration externer Hard- und Software. Aufgrund programmtechnischer Einschränkungen ist jedoch die Modellierung und Simulation größerer und komplexerer Verkehrsnetze nach [BEN09] und [WEI00] bisher nicht möglich.

SUMO (Simulation of Urban Mobility) [BBE15] [BBE11] wurde vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) entwickelt. Das Ziel war es, ein nicht-kommerzielles sowie frei verfügbares und erweiterbares mikroskopisches Werkzeug als Grundlage für Forschungsanwendungen zur Verfügung zu stellen [BK08]. In SUMO können unter anderem Fahrzeuge, Fußgänger und auch öffentlicher Verkehr explizit modelliert werden [DLR14]. Es ist ein unter General Public License (GPL) lizenziertes Open-Source-Simulationswerkzeug, der Quellcode liegt offen. Durch den Open-Source-Ansatz können die verwendeten Simulationsmodelle durch eigene Modelle ersetzt werden. Für die Anbindung von externen Anwendungen und zur Steuerung des Simulationsablaufes existiert das Traffic-Control-Interface (TraCI) [WPR08]. SUMO ist in Forschungsarbeiten weit verbreitet [SUM14] [SUM13], eine ausführliche Dokumentation ist im Internet verfügbar [SUM15].

VISSIM (Verkehr in Städten Simulation) [PTV15a] [PTV15b] wird von der Planung Transport Verkehr AG (PTV) als kommerzielles Programm entwickelt und vertrieben. In dem Simulationswerkzeug wird innerstädtischer Verkehr mikroskopisch abgebildet. Für eine meso- und makroskopische Simulation existieren zusätzliche Werkzeuge. VISSIM besitzt mit dem COM-Interface (Component Object Model) [FV10] eine Schnittstelle, mit der externe Programme an die Simulation angebunden werden und in die laufende Simulation eingreifen können. Das Verhaltensmodell kann wie bei den obigen Programmen durch externe Modelle ersetzt werden.

Werkzeug	mikroskopischer Modellansatz	Simulation großer Szenarien	Modellierung von VAS	open-source Ansatz
AIMSUN	+	+	-	-
PELOPS	o	-	o	-
SUMO	+	+	-	+
VISSIM	+	+	-	-

Tabelle 2-1: Vergleich der am häufigsten verwendeten Werkzeuge hinsichtlich ihrer Eignung zur Simulation von Verkehrsassistenzsystemen
(+ = erfüllt, o = neutral, - = nicht erfüllt)

2.4 Infrastruktureitige Maßnahmen zur Verkehrsbeeinflussung

Der maximale Verkehrsfluss wird durch Störungen und Behinderungen im Verkehr häufig nicht erreicht. Da die Flussteigerung durch den Bau neuer oder die Erweiterung bestehender Straßen aus Kosten- und Raumgründen häufig nicht möglich ist, streben infrastruktureitige

Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen eine effizientere Nutzung der vorhandenen Straßeninfrastruktur an. Dadurch soll nach [WIK11] und [KÖL07] eine Minimierung von Reisezeiten und Emissionen sowie die Maximierung der Sicherheit und Zuverlässigkeit erreicht werden. Für [AHR10] gibt es hierfür drei Möglichkeiten: Vermeidung, Verlagerung und die verträgliche Abwicklung von Verkehr. Nach [HFK08] sollen Verkehrsinformations- und -leitsysteme die Verkehrsteilnehmer in die Lage versetzen, sich im Straßennetz besser zu orientieren. Aufgrund der Kenntnis der aktuellen Verkehrslage sollen Fahrer frühzeitig auf Störungen reagieren. Das Wissen über Störungen ist für [WR06] die Voraussetzung für eine Verkehrsbeeinflussung und zur Ableitung von Optimierungsmaßnahmen. Für Möglichkeiten der Datenerfassung und -analyse wird beispielhaft auf [BMW08b] und [WR06] verwiesen. Abbildung 2-11 zeigt den Ablauf einer Verkehrsbeeinflussung durch infrastrukturseitige Maßnahmen.

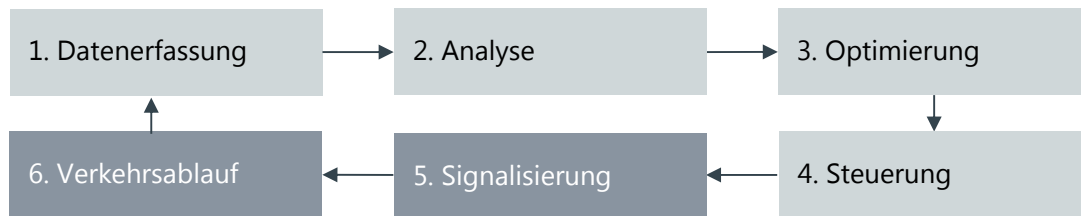


Abbildung 2-11: Schematischer Regelkreis für die Signalsteuerung zur Verkehrsbeeinflussung nach [WR06]

Eine Klassifikation von infrastrukturseitigen Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen erfolgt wie in Tabelle 2-2 dargestellt hinsichtlich mehrerer Kriterien. Der Wirkungsort beschreibt laut [DÖG07] und [KÖL07], ob eine Beeinflussungsmaßnahme im ganzen Verkehrsnetz, auf einer Trasse oder nur auf einzelne Fahrer-Fahrzeug-Einheiten wirkt. Die Adressaten sind nach [HFK08] und [BWS05] entweder nur individuelle Verkehrsteilnehmer oder das gesamte Kollektiv. [FRI08] unterscheidet zusätzlich, ob durch die Maßnahme das Verkehrsangebot oder die -nachfrage beeinflusst wird.

Klassifikation	Erläuterung
Wirkungsort	Netzebene, Trassenebene, Fahrzeugebene
Adressaten	Kollektiv, individuell
Verkehrsmanagement	Verkehrsangebot, Verkehrsnachfrage

Tabelle 2-2: Klassifikationskriterien für infrastrukturseitige Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen

In Tabelle 2-3 sind die infrastrukturseitigen Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen den Klassifikationskriterien zugeordnet. Für weiterführende Erklärungen zu den aufgeführten Maßnahmen wird beispielhaft auf [ADA11], [HFK08], [WR06], [BWS05] und [SKV05] verwiesen. Diese Maßnahmen haben sich nach [GIP08] hinsichtlich der Erhöhung der Verkehrssicherheit, der Verkehrsflussharmonisierung und der Reduktion von Staus bewährt. Es ist ersichtlich, dass die

infrastrukturseitigen Maßnahmen bisher ausschließlich auf Netz- und Trassenebene wirken und somit nicht das Potenzial der lokalen, individuellen Optimierung des Verkehrs durch Fahrzeuge beziehungsweise Assistenzsysteme nutzen.

Maßnahmen	Netz- ebene	Trassen- ebene	Fahrzeug- ebene	kollektiv	individuell	Verkehrs- angebot	Verkehrs- -nachfrage
Verkehrsfunk	x				x		x
Lichtsignalanlagen	x	x		x		x	
Streckenbeeinflussungsanlage		x		x			x
Netzbeeinflussungsanlage	x			x			x
Knotenbeeinflussungsanlage	x			x			x
Zuflussregelanlage		x		x			x
Temp. Seitenstreifenfreigabe		x		x		x	
Parkleitsysteme	x			x			x
Road-Pricing	x	x			x		x

Tabelle 2-3: Klassifikation von infrastrukturseitigen Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen

2.5 Ebenen der Fahrzeugführung

Die Aufgaben der Fahrzeugführung ergeben sich aus der Bewegung einer Fahrer-Fahrzeug-Einheit im Straßenverkehr und werden in drei hierarchische Ebenen eingeteilt. Für deren Darstellung wird im Folgenden das in Abbildung 2-12 gezeigte 3-Ebenen-Modell nach [DON15] verwendet. Es unterscheidet zwischen Navigation, Bahnführung und Stabilisierung. Diesen Fahraufgaben werden die entsprechenden Ebenen der Umwelt zugeordnet.

Auf der Navigationsebene wird eine Fahrtroute durch das Straßennetz bestimmt. Die Festlegung der Route erfolgt in der Regel vor der Fahrt. Während einer Fahrt überwacht der Fahrer anhand von Informationsquellen wie zum Beispiel Straßennamen und Wegweisern die Einhaltung der Route. Aufgrund von Staus oder Störungen durch beispielsweise Baustellen kann es für den Fahrer notwendig werden, eine Alternativroute auszuwählen.

Der dynamische Fahrprozess findet in den Ebenen Bahnführung und Stabilisierung statt. Auf Bahnführungsebene erfolgt die Realisierung der gewählten Fahrtroute, es wird die Quer- und Längsführung des Fahrzeugs beschrieben.

Basierend auf Informationen des eigenen Fahrzeugs und der Umwelt beziehungsweise der befahrenen Straße bestimmt der Fahrer die Führungsgrößen seiner Regelung, wie zum Bei-

spiel Sollspur und Sollgeschwindigkeit. Diese Größen sind von dem Fahrer so zu wählen, dass er sich mit seinem Fahrzeug unfallfrei im Straßenraum bewegen kann.

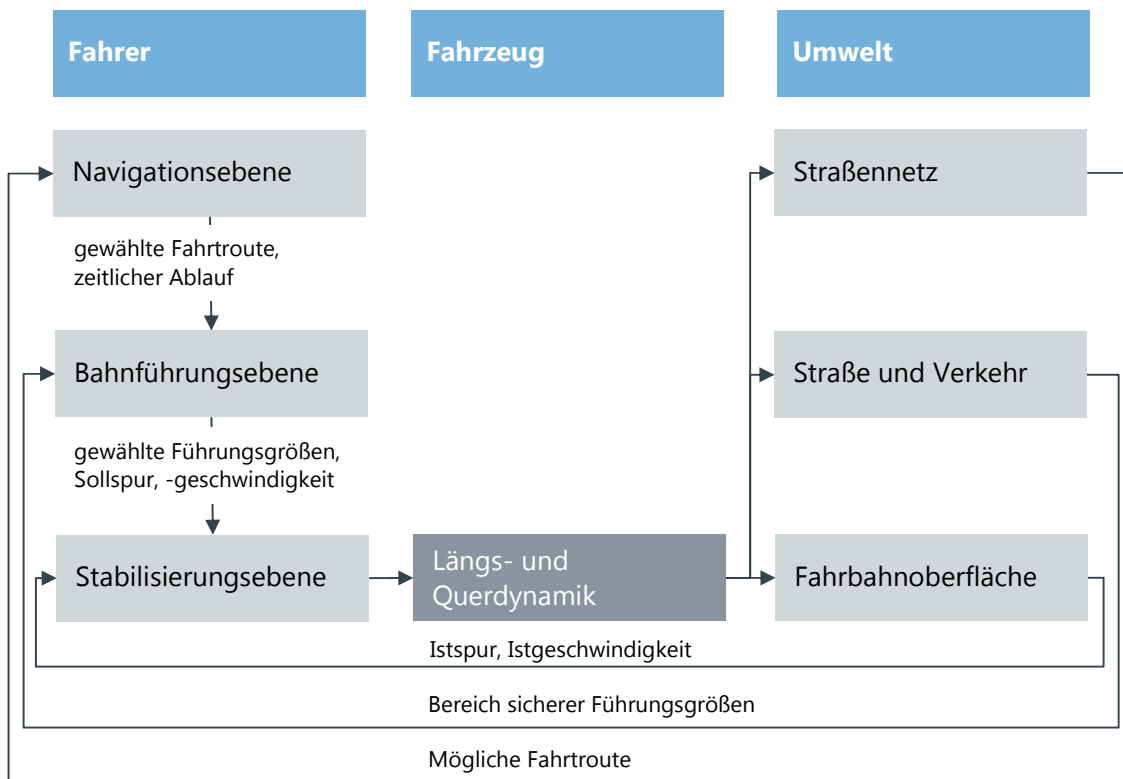


Abbildung 2-12: 3-Ebenen-Modell der Fahrzeugführung nach [DON15]

Die Umsetzung der bestimmten Führungsgrößen erfolgt auf der Stabilisierungsebene. Der Fahrer benutzt dazu mit dem Lenkrad sowie dem Brems- und Gaspedal die Stellglieder des Fahrzeugs. Im Rahmen der Stabilisierungsebene führt der Fahrer korrigierende Eingriffe durch, um die Regelabweichungen zu minimieren.

2.6 Klassifikation von Fahrerassistenzsystemen

Die aus der Fahrzeugführung resultierende Bewegung des Fahrzeugs wirkt auf die Umwelt und somit auch auf die umgebenden Verkehrsteilnehmer. Abbildung 2-13 zeigt schematisch den dazugehörigen Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Straße.

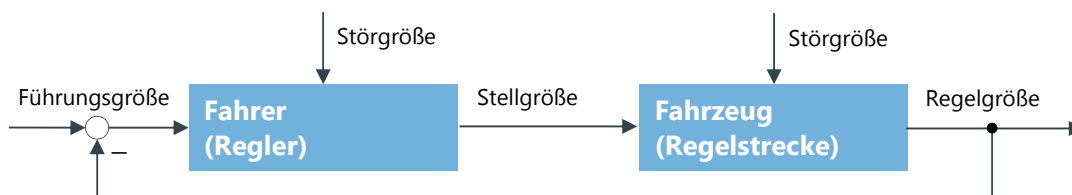


Abbildung 2-13: Schematischer Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Straße nach [DIL73]

Es haben dementsprechend nur solche Fahrerassistenzsysteme Auswirkungen auf den Verkehr, die den Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Straße beeinflussen. Daher werden Komfort- und Unterhaltungssysteme im Folgenden nicht berücksichtigt, da sie den Regelkreis nur als mögliche Störgröße des Fahrers beeinträchtigen.

Die Klassifikation von Fahrerassistenzsystemen erfolgt hinsichtlich der Assistenzstrategie, der Assistenzebene und des Assistenzkonzeptes, vgl. Tabelle 2-4. Diese werden im Folgenden basierend auf [GSS15] [SCH13], [VBS06], [WIL04] und [NAA98] erläutert.

Klassifikation	Erläuterung
Assistenzstrategie	Informieren, Warnen, Intervenieren, Agieren
Assistenzebene	Navigationsebene, Bahnführungsebene, Stabilisierungsebene
Assistenzkonzept	fahrzeugautonom, infrastrukturgestützt, kooperativ

Tabelle 2-4: Klassifikation von Fahrerassistenzsystemen

Die Art der Unterstützung eines Fahrers durch ein Fahrerassistenzsystem wird mit der Assistenzstrategie beschrieben. Warnende und informierende Systeme geben dem Fahrer in den von dem Assistenzsystem adressierten Situationen einen Hinweis. Der Unterschied zwischen warnen und informieren liegt dabei in dem Vorliegen einer Gefahrensituation. Ein intervenierendes Assistenzsystem greift nur im Bedarfsfall in das Fahrverhalten des Fahrzeugs ein und basiert somit auf einem warnenden System. Im Gegensatz dazu beschreibt das Agieren die Strategie, bei der ein Fahrer in spezifizierten Szenarien kein Bestandteil mehr des Regelkreises ist.

Die Assistenzebene bezieht sich auf das 3-Ebenen-Modell der Fahrzeugführung und beschreibt, auf welcher Ebene die Fahrerassistenzsysteme wirken. Die Hauptaufgabe eines Fahrerassistenzsystems ist es unter anderem nach [WIN02], den Fahrer zu entlasten und seine Fahrfähigkeiten zu ergänzen. Um das laut [WIL04] auf Navigationsebene vorherrschende Informationsdefizit zu beseitigen, sind informierende oder warnende Fahrerassistenzsysteme sinnvoll. Aufgrund der notwendigen Fahrerunterstützung werden auf der Stabilisierungsebene nur agierende oder intervenierende Systeme eingesetzt. Auf der Bahnführungsebene ist eine solche Einteilung nicht zu identifizieren.

Das Assistenzkonzept beschreibt die Informationsbeschaffung für ein Fahrerassistenzsystem und damit die Verknüpfung von Fahrzeug und Umwelt. Im Gegensatz zum infrastrukturgestützten oder kooperativen Assistenzsystem wird ein fahrzeugautonomes System nicht von der Umwelt unterstützt. Mit der Infrastruktur kommunizierende Assistenzsysteme beziehen ihre Informationen häufig von einer zentralen Stelle, wie zum Beispiel einer Verkehrsleitzentrale. Laut [WIL04] wird bei einem solchen System oft eine globale Leitstrategie von einer Leitstelle mit einem zentralen Informationsmanagement verfolgt. Kooperativen Systemen fehlt im Gegensatz dazu die zentral regelnde Leitstelle. Informationen werden zwischen den einzelnen Verkehrsteilnehmern und lokalen Infrastrukturen ausgetauscht. Abbildung 2-14 zeigt die Zusammenhänge zwischen Assistenzstrategie, Assistenzebene und Assistenzkonzept.

Auf dem Markt erhältliche Fahrerassistenzsysteme decken alle Assistenzstrategien ab. Nach [VBS06] konzentrieren sich agierende Systeme auf Basismanöver wie zum Beispiel „Fahrzeug folgen“. Insgesamt dominieren aber informierende beziehungsweise warnende Assistenzsysteme. Dabei herrschen innerhalb der Assistenzebene laut [SCH07] die navigierende und stabilisierende Ebene vor, die meisten Systeme arbeiten fahrzeugautonom.

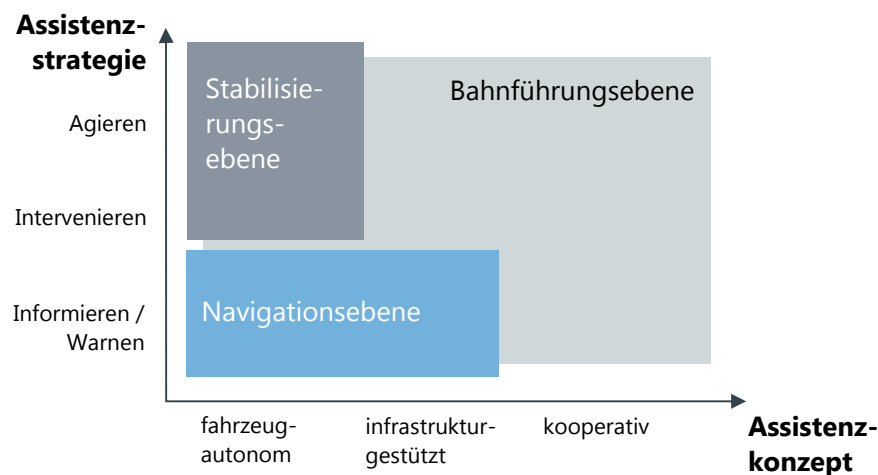


Abbildung 2-14: Assistenzebene eines Fahrerassistenzsystems in Abhängigkeit der Assistenzstrategie und des Assistenzkonzeptes nach [WIL04]

Aktuelle Forschungsarbeiten bauen auf den heute verfügbaren Fahrerassistenzsystemen auf [AUD15a] [AUD15b] [BMW15a] [DAI13]. Der Funktionsumfang von agierenden Systemen wird dabei durch eine zunehmende Automatisierung deutlich erweitert [ROO15] [BAS12]. Eine entsprechende Klassifikation von automatischen Fahrfunktionen sowie die Erwartungen an den Fahrer zeigt Tabelle 2-5.

Klassifikation	Beschreibung Automatisierungsgrad und Erwartung des Fahrers
Ohne Assistenz	Der Fahrer führt dauerhaft die Längs- und Querführung aus.
Assistiert	Der Fahrer führt dauerhaft entweder die Längs- oder die Querführung aus. Die jeweils andere Fahraufgabe wird in gewissen Grenzen vom System ausgeführt. Der Fahrer muss das System dauerhaft überwachen und jederzeit zur Übernahme der vollständigen Fahrzeugführung bereit sein.
Teilautomatisiert	Das System übernimmt die Längs- und Querführung für eine gewisse Zeit und / oder in spezifischen Situationen. Der Fahrer muss das System dauerhaft überwachen und jederzeit zur Übernahme der vollständigen Fahrzeugführung bereit sein.
Hochautomatisiert	Das System übernimmt die Längs- und Querführung für einen gewissen Zeitraum in spezifischen Situationen. Der Fahrer muss das System nicht dauerhaft überwachen. Bei Bedarf wird der Fahrer zur Übernahme der Fahraufgabe mit ausreichender Zeitreserve aufgefordert. Die Systemgrenzen werden vom System erkannt. Das System ist nicht in der Lage, aus jeder Ausgangssituation den risikominimalen Zustand herbeizuführen.
Vollautomatisiert	Das System übernimmt die Längs- und Querführung vollständig in einem definierten Anwendungsfall. Der Fahrer muss das System nicht überwachen. Vor dem Verlassen des Anwendungsfalles fordert das System den Fahrer mit ausreichender Zeitreserve zur Übernahme der Fahraufgabe auf. Erfolgt dies nicht, wird in den risikominimalen Systemzustand zurückgeführt. Alle Systemgrenzen werden durch das System erkannt und es ist in allen Situationen in der Lage, den risikominimalen Systemzustand zurückzuführen.

Tabelle 2-5: Klassifikation automatisierter Fahrfunktionen nach [BAS12]

3 Verkehrsbeeinflussung durch Verkehrsassistenzsysteme

Eine Fahrer-Fahrzeug-Einheit besitzt mehrere Freiheitsgrade, mit denen die individuelle Fahrzeugdynamik und somit die Bewegung innerhalb eines Straßennetzes beeinflusst werden kann. Sie kann beschleunigen und verzögern sowie innerhalb des befahrenen Fahrstreifens weiter links oder rechts fahren. Darüber hinaus kann die Fahrer-Fahrzeug-Einheit den Fahrstreifen wechseln und die Fahrtroute ändern.

Aufbauend auf diesen Freiheitsgraden werden im Folgenden die möglichen Auswirkungen von individueller Fahrdynamik auf die Verkehrskenngrößen hergeleitet. Diese Dynamik kann durch Verkehrsassistenzsysteme beeinflusst werden. Anschließend wird durch einen Vergleich des realen mit dem idealen Verkehr im Fundamentaldiagramm des Verkehrs das Optimierungspotenzial von Verkehrsassistenzsystemen ermittelt.

3.1 Herleitung der Auswirkungen auf die Verkehrskenngrößen

Die Veränderung eines der oben genannten Freiheitsgrade wirkt sich direkt auf die zukünftige Position der Fahrer-Fahrzeug-Einheit in dem Straßennetz aus und beeinflusst somit die in Kapitel 2.2 vorgestellten Verkehrskenngrößen. Im Folgenden werden die qualitativen Auswirkungen von Assistenzsystemen auf den Verkehr basierend auf den in Abschnitt 2.6 vorgestellten Klassifikationsarten Assistenzstrategie, Assistenzebene und Assistenzkonzept bestimmt.

Ein Verkehrsassistenzsystem mit informierender oder warnender Assistenzstrategie empfiehlt dem Fahrer eine Bewegungsanpassung innerhalb der Freiheitsgrade. Die Regelung selbst bleibt weiterhin Aufgabe des Fahrers. Durch ein intervenierendes oder agierendes System ist der Fahrer hingegen nur noch teilweise oder gar nicht mehr Bestandteil des Regelkreises Fahrer-Fahrerassistenzsystem-Fahrzeug. Bei den beiden letztgenannten Assistenzstrategien wird im Gegensatz zu den informierenden oder warnenden Strategien die genaue Befolgung der vom Assistenzsystem berechneten Ausgangsgrößen gewährleistet, vorausgesetzt der Fahrer greift nicht in die Regelung ein. Alle vier Assistenzstrategien beeinflussen demnach die Freiheitsgrade und somit die Verkehrsdynamik der Fahrer-Fahrzeug-Einheit. Dadurch haben alle Strategien, wie die folgende Betrachtung hinsichtlich der Assistenzebene zeigt, Auswirkungen auf die Verkehrskenngrößen.

Zur Beschreibung der qualitativen Auswirkungen von Verkehrsassistenzsystemen auf die Verkehrskenngrößen, basierend auf der Assistenzebene, wird das in Abbildung 3-1 dargestellte Verkehrsnetz betrachtet. In Abschnitt A beginnt die Fahrt der Fahrer-Fahrzeug-Einheit, die Messstelle für die lokalen Kenngrößen befindet sich auf dem in Fahrtrichtung rechten Fahrstreifen in Abschnitt B. Dieser Fahrstreifen wird in dem dargestellten Szenario auch für die Bestimmung der momentanen Verkehrskenngrößen verwendet. Für jede Betrachtung einer Assistenzebene durchfährt die Fahrer-Fahrzeug-Einheit das Verkehrsnetz erneut.

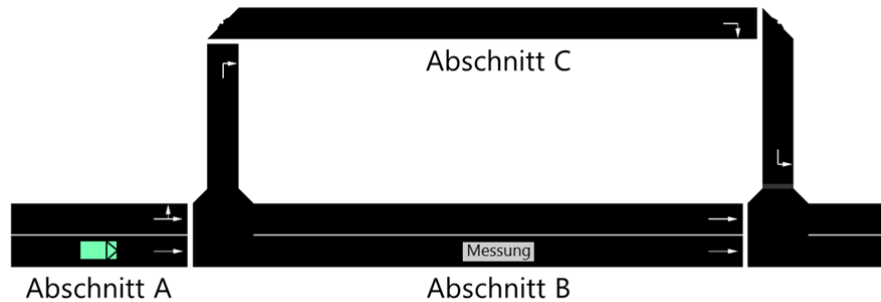


Abbildung 3-1: Verkehrsnetz zur Herleitung der Auswirkungen von Verkehrsassistenzsystemen auf die Verkehrskenngrößen

Durch eine Beeinflussung des Fahrverhaltens auf Navigationsebene wird die befahrene Route verändert. Für das beispielhafte Verkehrsnetz bedeutet dies, dass die Fahrer-Fahrzeug-Einheit das Verkehrsnetz nicht über Abschnitt B, sondern über Abschnitt C durchfährt. Dadurch reduziert sich die momentane Anzahl an Fahrzeugen in Abschnitt B. Hieraus ergibt sich eine Veränderung der Zeitlücke beziehungsweise des Abstandes zwischen Fahrer-Fahrzeug-Einheiten und damit die Beeinflussung der mikroskopischen Verkehrskenngrößen. Daraus resultieren Auswirkungen auf die gemittelten makroskopischen Kenngrößen und damit auf den Verkehrsfluss und die Verkehrsdichte. Für die Betrachtung der Bahnführungsebene wird basierend auf dem mikroskopischen Verhaltensmodell einer Fahrer-Fahrzeug-Einheit zwischen dem Fahrzeugfolge- und dem Fahrstreifenwechselverhalten unterschieden. Durch ein variiertes Fahrzeugfolgeverhalten durchfährt die Fahrer-Fahrzeug-Einheit das Verkehrsnetz mit einem veränderten Geschwindigkeitsprofil $v(t)$ auf dem in Fahrtrichtung rechten Fahrstreifen durch Abschnitt B. Dadurch werden sowohl die mikroskopischen als auch die makroskopischen Verkehrskenngrößen beeinflusst. Ein verändertes Fahrstreifenwechselverhalten hat durch den Bezug der Kenngrößen auf einen Fahrstreifen dieselben Auswirkungen wie eine veränderte Fahrtroute. In diesem Fall fährt das Fahrzeug im Abschnitt B auf dem in Fahrtrichtung linken Fahrstreifen und somit nicht mehr über den Messquerschnitt. Ein Eingriff auf der Stabilisierungsebene bewirkt ausschließlich eine Minimierung der Abweichungen zwischen den Regel- und Führungsgrößen. Ein Assistenzsystem auf Stabilisierungsebene hat somit keinen wesentlichen Einfluss auf die Verkehrskenngrößen. Damit können durch ein verändertes Fahrverhalten alle in Abbildung 2-7 und Abbildung 2-8 zusammengefassten Verkehrskenngrößen beeinflusst werden.

Bezogen auf das Assistenzkonzept ermöglicht ein frühzeitiges Wissen über den Verkehrszustand und vorausliegende Störungen eine vorausschauende und damit auch eine verkehrsadaptive Fahrweise. Relevante Informationen für ein Verkehrsassistenzsystem sind zum Beispiel die Geschwindigkeiten aller vorausfahrenden Fahrer-Fahrzeug-Einheiten, der Status von Lichtsignalanlagen inklusive der Phasenrestlaufzeiten oder auch die Position von Baustellen und Fahrstreifenzusammenführungen. Dieses Wissen kann aufgrund der benötigten Vorausschau nicht oder nur unzureichend durch fahrzeugautonome Sensorik ermittelt werden.

Zusammenfassend zeigt Tabelle 3-1 die zur Verkehrsflusssteigerung nutzbaren Ausprägungen von Verkehrsassistenzsystemen bezogen auf die Klassifikationsmöglichkeiten. Im Rahmen der Assistenzstrategie werden ausschließlich informierende und agierende Systeme be-

trachtet, da diese sowohl warnende als auch intervenierende Funktionen umfassen können. Für die Beeinflussung der Verkehrskenngrößen sind Assistenzsysteme auf Navigations- oder Bahnführungsebene umzusetzen. Für das Assistenzkonzept ist wesentlich, dass es aufgrund der notwendigen Vorausschau kommunikationsbasiert und nicht fahrzeugautonom ist.

Klassifikation	Ausprägungen verkehrsoptimierender VAS
Assistenzstrategie	Informieren, Agieren
Assistenzebene	Navigationsebene, Bahnführungsebene
Assistenzkonzept	kommunikationsbasiert

Tabelle 3-1: Sinnvolle Ausprägungen verkehrsoptimierender Verkehrsassistenzsysteme hinsichtlich der Klassifikationsmöglichkeiten

Jedoch erlaubt die grundsätzliche Beeinflussung der Kenngrößen noch keinen Rückschluss auf das verkehrliche Potenzial von Verkehrsassistenzsystemen.

3.2 Bestimmung des Optimierungspotenzials im Fundamentaldiagramm

Das theoretische Potenzial für die Steigerung des Verkehrsflusses durch Verkehrsassistenzsysteme wird im Folgenden anhand des Fundamentaldiagramms aufgezeigt. Es zeigt die makroskopische Beziehung zwischen dem Verkehrsfluss, der Verkehrsdichte und der mittleren momentanen Geschwindigkeit. Ein anhand von realen Messungen erzeugtes Fundamentaldiagramm zeigt Abbildung 3-2.

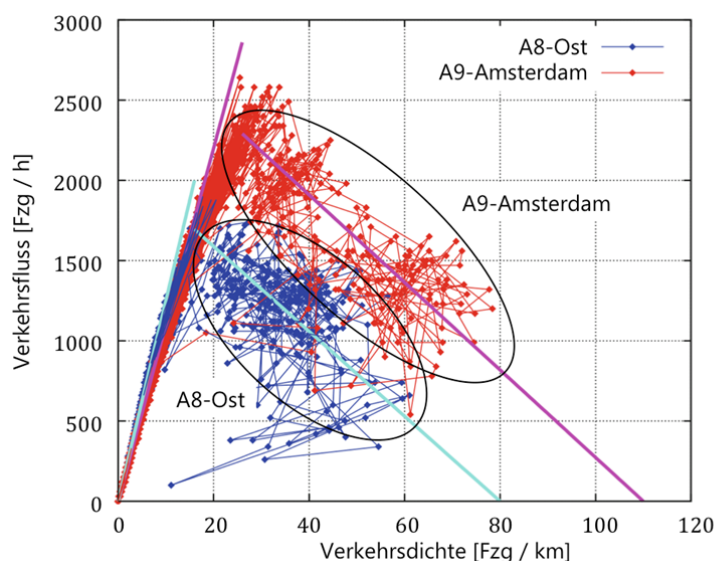


Abbildung 3-2: Fundamentaldiagramm aus realen Messdaten [TK10]

Es fällt insbesondere der instabile Bereich auf, welcher durch die starke Streuung in den Messdaten verdeutlicht wird. In diesem ist eine große Volatilität des Verkehrsflusses bei glei-

cher Verkehrsdichte zu beobachten. Dabei ist das individuelle Fahrverhalten nicht effizient, der zur Verfügung stehende Straßenraum wird nicht für den maximalen Verkehrsfluss genutzt. Basierend auf der Zustandsgleichung des Verkehrs beträgt in Abbildung 3-2 die mittlere Geschwindigkeit im stabilen Verkehr ca. $\bar{v}_{max} = 100 \text{ km/h}$.

Ein ideales Fundamentaldiagramm für den idealen Verkehr enthält keine negativen Wechselwirkungen zwischen Fahrer-Fahrzeug-Einheiten und somit keinen instabilen Bereich. Dieses entspricht dem Ziel von Verkehrsassistenzsystemen und kann anhand des Verkehrsflusses

$$\text{Verkehrsfluss} \quad q = \frac{3600 \frac{s}{h}}{t_{\text{Zeitlücke}} + \frac{l_{Fzg}}{\bar{v}_l}}, \quad \text{Gleichung 3-1}$$

der Verkehrsdichte

$$\text{Verkehrsdichte} \quad \rho = \frac{1000 \frac{m}{km}}{\bar{v}_m \cdot t_{\text{Zeitlücke}} + s_0 + l_{Fzg}} \quad \text{Gleichung 3-2}$$

sowie unter Berücksichtigung der Zustandsgleichung des Verkehrs

$$\text{Zustandsgleichung des Verkehrs} \quad q = \bar{v}_m \cdot \rho \quad \text{Gleichung 3-3}$$

erstellt werden. Damit ergibt sich ein abschnittsweise linearer Verlauf in Abhängigkeit der Geschwindigkeit v und der Zeitlücke zwischen zwei Fahrer-Fahrzeug-Einheiten $t_{\text{Zeitlücke}}$. Die Länge einer Fahrer-Fahrzeug-Einheit l_{Fzg} sowie der Stillstandsabstand s_0 werden im Folgenden als konstant angenommen, da diese nicht durch ein Verkehrsassistenzsystem beeinflusst werden.

Für die Darstellung des idealen Fundamentaldiagramms in Abbildung 3-3 werden die maximale mittlere Geschwindigkeit \bar{v}_{max} und die Zeitlücke $t_{\text{Zeitlücke}}$ variiert. Es werden die Kombinationen aus $\bar{v}_{max} = 130 \text{ km/h}$ mit $t_{\text{Zeitlücke}} = 1,0 \text{ s}$ sowie $\bar{v}_{max} = 100 \text{ km/h}$ mit $t_{\text{Zeitlücke}} = 1,8 \text{ s}$ betrachtet. Dabei entspricht eine Zeitlücke $t_{\text{Zeitlücke}} = 1,8 \text{ s}$ der gesetzlichen Vorgabe, die halbe Geschwindigkeit in Kilometern pro Stunde als Abstand in Metern zu einem vorausfahrenden Fahrzeug einzuhalten [HKD15]. Für die Darstellung wurden die Länge einer Fahrer-Fahrzeuge-Einheit $l_{Fzg} = 5 \text{ m}$ und der Stillstandsabstand $s_0 = 1 \text{ m}$ angenommen.

Durch einen Vergleich des realen (Abbildung 3-2) mit dem idealen (Abbildung 3-3) Fundamentaldiagramm wird ersichtlich, dass die gefahrenen Zeitlücken in der Realität unterhalb der gesetzlichen Forderung von $t_{\text{Zeitlücke}} = 1,8 \text{ s}$ liegen. Aus der Verkehrsfluss-Verkehrsdichte-Beziehung lässt sich auf der niederländischen A9 eine mittlere gefahrene Zeitlücke von $t_{\text{Zeitlücke}} = 1,2 \text{ s}$ abschätzen.

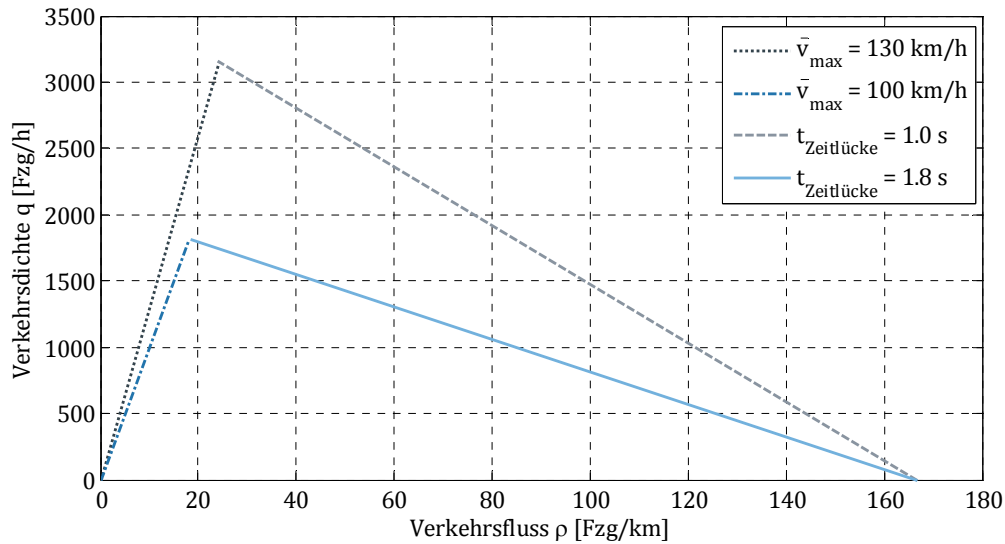


Abbildung 3-3: Ideales Fundamentaldiagramm ohne Berücksichtigung von negativen Wechselwirkungen zwischen Fahrer-Fahrzeug-Einheiten in Abhängigkeit der mittleren Geschwindigkeit \bar{v}_{\max} und die Zeitlücke $t_{\text{Zeitlücke}}$

Untersuchungen von real gefahrenen Netto-Zeitlücken zeigen bei Geschwindigkeiten von $v \geq 60 \text{ km/h}$ und damit freiem Verkehr einen Modalwert von ca. $t_{\text{Zeitlücke}} = 1,0 \text{ s}$. Bei gestautem Verkehr beträgt der Modalwert $t_{\text{Zeitlücke}} = 1,4 \text{ s}$, vergleiche Abbildung 3-4. Im Gegensatz dazu entsprechen die Messungen auf der A8 der gesetzlichen Forderung hinsichtlich der Zeitlücke.

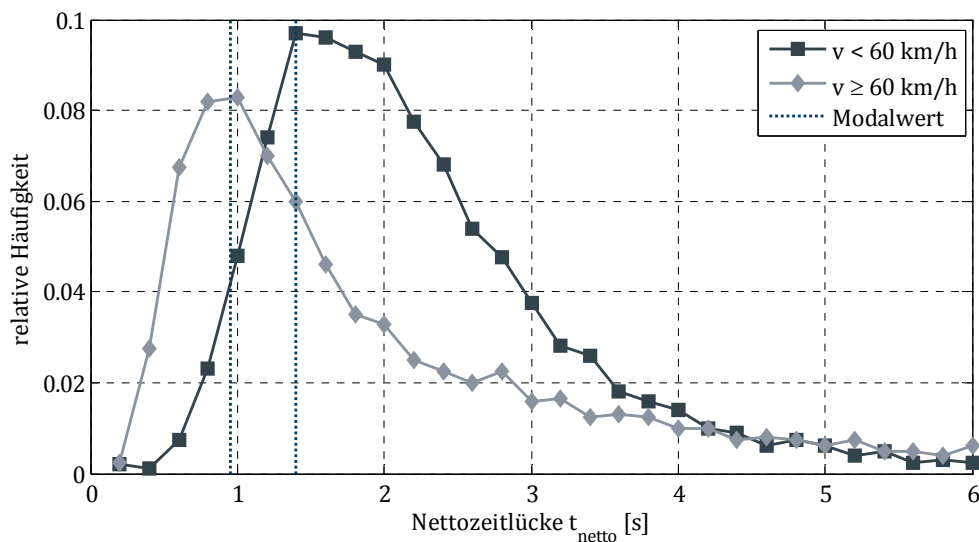


Abbildung 3-4: Verteilung der Nettozeitlücken t_{Netto} für gestauten $v < 60 \text{ km/h}$ und freien Verkehr $v \geq 60 \text{ km/h}$ nach [TK10]

Durch real gefahrene Zeitlücken unterhalb der gesetzlichen Forderungen wird ein höherer Verkehrsfluss bei gleicher Verkehrsdichte und somit eine höhere mittlere momentane Geschwindigkeit erreicht. Dies belegt auch das reale Fundamentaldiagramm, auf der niederländischen A9 wird gegenüber der A8 ein um fast 30 % höherer Verkehrsfluss erreicht (ca. 2250 Fzg/h zu ca. 1750 Fzg/h). Aufgrund der dafür notwendigen höheren Geschwindigkeiten bei gleichen Fahrzeugabständen steigt in kritischen Situationen die notwendige Verzögerung zur Gewährleistung der Unfallfreiheit. Daraus resultiert die hohe Volatilität des Verkehrsflusses im instabilen Bereich.

Weiterhin zeigt der Vergleich des realen und des idealen Fundamentaldiagramms, dass im instabilen Verkehrsbereich sowohl auf der A8 als auch auf der A9 ein geringerer Verkehrsfluss bei gleicher Verkehrsdichte vorhanden ist als bei idealem Verkehr.

Bezogen auf die Zustandsgleichung des Verkehrs und damit auf das Fundamentaldiagramm liegt das Optimierungspotenzial von Verkehrsassistenzsystemen in der Vermeidung beziehungsweise Reduzierung der Geschwindigkeitsvolatilität und damit des instabilen Bereiches. Dies kann unter anderem durch eine automatische Abstandsregelung und damit durch das Vermeiden einer unnötig starken Verzögerung, zum Beispiel aufgrund von Schätzfehlern und Reaktionszeiten des menschlichen Fahrers, erreicht werden.

Aus der Betrachtung des Fundamentaldiagramms lässt sich also der Optimierungsansatz des Verkehrs durch Verkehrsassistenzsysteme ableiten. Durch die Erhöhung der kritischen Dichte ρ_{krit} resultiert bei gleicher mittlerer momentaner Geschwindigkeit \bar{v}_m ein vergrößerter maximaler Verkehrsfluss und somit eine gesteigerte Kapazität C_{opt} . Abbildung 3-5 zeigt die prinzipielle Darstellung eines Fundamentaldiagramms mit gesteigerter kritischer Verkehrsdichte.

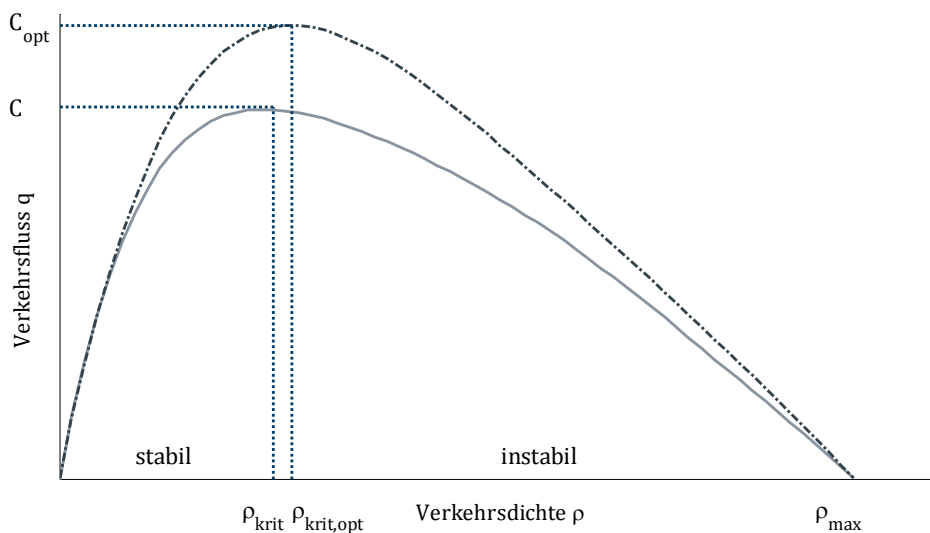


Abbildung 3-5: Prinzipdarstellung eines Fundamentaldiagramms mit gesteigerter kritischer Verkehrsdichte C_{opt} nach [DET11]

3.3 Diskussion

Die grundlegende Betrachtung von Verkehrsassistenzsystemen zu Beginn dieses Kapitels hat gezeigt, dass diese Systeme sowohl die mikroskopischen als auch die makroskopischen Verkehrskenngrößen beeinflussen können. Dabei haben agierende gegenüber informierenden Assistenzsystemen den Vorteil, dass die berechneten Führungsgrößen exakt umgesetzt werden. Weiterhin sollten die Assistenzsysteme möglichst eine Vorausschau, zum Beispiel durch kommunikationsbasierte Daten, besitzen. Somit haben die Verkehrsassistenzsysteme im Vergleich mit menschlichen Fahrern einen größeren Wissenshorizont und können verkehrsadaptive Fahrstrategien berechnen und entweder dem Fahrer als Information mitteilen oder durch eine aktive Regelung umsetzen.

Dabei ist betrachtenswert, wie ein menschlicher Fahrer sein Fahrverhalten anpasst, wenn er eine identische Vorausschau besitzt. Es ist offen, ob dann der Fahrer beispielsweise durch die Berücksichtigung mehrerer Informationen und einer besseren Situationsinterpretation ein verkehrseffizienteres Fahrverhalten als das Assistenzsystem umsetzt.

Mögliche Nachteile eines Verkehrsassistenzsystems liegen in der Einhaltung der gesetzlich vorgeschriebenen Zeitlücke. Dadurch wird im Gegensatz zu einem Fahrer der Verkehrsfluss im fließenden Verkehr reduziert. Durch geringere Zeitlücken gegenüber einem Assistenzsystem steigt aber die Geschwindigkeitsvolatilität im Verkehr, wodurch die Verkehrsstabilität reduziert wird. Verkehrsassistenzsysteme sind durch die Einhaltung der vorgeschriebenen Zeitlücken zwar im freien Verkehr nicht so effizient wie ein menschlicher Fahrer, besitzen aber eine höhere Verkehrsstabilität.

Diese Eigenschaft von Verkehrsassistenzsystemen kann genutzt werden, um den Verkehrsfluss durch die Steigerung der kritischen Dichte zu erhöhen. Basierend auf der obigen Herleitung kann dies durch die Vermeidung der negativen Wechselwirkungen zwischen Fahrer-Fahrzeug-Einheiten und damit die Reduktion des instabilen Verkehrsbereiches erreicht werden.

Grundlage für die Gültigkeit der Zustandsgleichung des Verkehrs ist homogener und stationärer Verkehr, welcher sich im Gleichgewicht befindet. Dies wird auf Autobahnen aufgrund von zum Beispiel Ein- und Ausfahrten oder Baustellen nur abschnittsweise erreicht, in Städten jedoch nur in Ausnahmen. Dadurch ist hier die Herleitung basierend auf dem Fundamentaldiagramm nicht gültig. Allerdings existieren in Städten verschiedenste Störungen im Verkehr wie zum Beispiel Lichtsignalanlagen. Diese reduzieren den maximalen Verkehrsfluss und bieten somit Optimierungspotenzial für Verkehrsassistenzsysteme basierend auf einem vorausschauenden Fahrverhalten.

4 Kopplung von Verkehrsfluss- mit Assistenzsystemmodellen

Die Betrachtungen im vorangegangenen Kapitel 3 zeigen, dass Verkehrsassistenzsysteme durch ein angepasstes Fahrverhalten Auswirkungen auf die Verkehrskenngrößen haben und somit den Verkehrsfluss steigern können. Dadurch werden die bisher ausschließlich infrastrukturseitigen und nur auf Netz- und Trassenebene wirkenden Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen um die Optimierung auf Fahrzeugebene ergänzt.

Um Verkehrsassistenzsysteme systematisch auslegen, untersuchen und bewerten zu können, ist eine Simulationsbetrachtung notwendig. Die Gründe hierfür werden zu Beginn dieses Kapitels genannt. Um die zielgerichtete Untersuchung in einem Simulationswerkzeug zu ermöglichen, werden im Rahmen dieser Arbeit existierende Verkehrsflussmodelle mit neuen Assistenzsystemmodellen gekoppelt. Dies ermöglicht die Betrachtung aller in Kapitel 3 bestimmten verkehrswirksamen Assistenzsysteme in beliebigen Verkehrsnetzen. Für die Herleitung der Modellkopplung wird im weiteren Verlauf des Kapitels der Regelkreis Fahrer-Fahrzeug in einer theoretischen Betrachtung um die Verkehrsassistenzsysteme erweitert. Diese werden anschließend auf das mikroskopische Verhaltensmodell einer Fahrer-Fahrzeug-Einheit übertragen um dadurch eine generische Modellkopplung für informierende und agierende Assistenzsysteme abzuleiten.

4.1 Zur Notwendigkeit einer Simulationsbetrachtung

Verkehrsassistenzsysteme beeinflussen das Fahrverhalten einer Fahrer-Fahrzeug-Einheit entweder indirekt durch die Weitergabe von Informationen an den Fahrer oder direkt durch aktive Eingriffe in die Fahrzeugregelung. Für die systematische Bestimmung der Auswirkungen auf den Verkehr ist aus folgenden Gründen die Verwendung einer Simulation notwendig, vgl. [DET11]:

1. Es existieren nicht ausreichend viele mit Verkehrsassistenzsystemen ausgestattete Versuchsfahrzeuge, um verschiedene Assistenzstrategien und Ausstattungsraten im realen Verkehr zu untersuchen.
2. Selbst wenn für ein System ausreichend viele ausgestattete Forschungsfahrzeuge existieren, wären die damit untersuchten Verkehrsszenarien aufgrund der Anzahl zusätzlicher Fahrzeuge nicht mehr repräsentativ.
3. Eine großräumige Auswertung der verkehrlichen Auswirkungen von Assistenzsystemen im Vergleich zum Status Quo ist in der Realität nicht möglich.
4. Der reale Straßenverkehr ermöglicht keine reproduzierbaren Untersuchungen, um die Auswirkungen verschiedener Ausprägungen oder Parametrisierungen von Verkehrsassistenzsystemen untereinander zu vergleichen.

Die genannten Punkte zeigen, dass eine alleinige Auslegung und Erprobung von Verkehrsassistenzsystemen in der Realität nicht zielführend ist. Dadurch wird die Notwendigkeit eines

Konzeptes für die Kopplung von Verkehrsfluss- mit Verkehrsassistenzsystemmodellen für deren systematische Untersuchung in Simulationswerkzeugen deutlich.

4.2 Regelkreis Fahrer-Verkehrsassistenzsystem-Fahrzeug

Die Herleitung der Kopplung von Assistenzsystem- und Verkehrsflussmodellen erfolgt auf Basis des in Kapitel 2.5 vorgestellten Regelkreises Fahrer-Fahrzeug-Straße. Dieser wird im Folgenden um Verkehrsassistenzsysteme erweitert. Dabei werden diese hinsichtlich der Assistenzstrategie und somit zwischen informierenden und agierenden Systemen unterschieden. Eine Differenzierung bezogen auf die Assistenzebene ist nicht notwendig, weder hat die Stabilisierungsebene Einfluss auf die Verkehrskenngrößen noch wird die Navigationsebene in den Regelkreisen abgebildet. Die Erweiterung der Regelkreise erfolgt daher auf Bahnführungsebene. Das Assistenzkonzept wird nicht betrachtet, da es nur die Art der Eingangsgrößen beziehungsweise die Informationsgewinnung des Verkehrsassistenzsystems beschreibt und somit für den Regelkreis Fahrer-Verkehrsassistenzsystem-Fahrzeug nicht relevant ist.

Für die Erweiterung der Regelkreise wird in diesem Abschnitt die auf [DIN09] basierende Darstellung von Wirkungsplänen verwendet. Diese zeigt den Zusammenhang zwischen den Gliedern des Regelkreises, ohne deren technischen Einzelheiten zu berücksichtigen. Die Glieder sind beispielsweise ein Regler oder dessen Regelstrecke. Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendeten Begrifflichkeiten werden entsprechend Tabelle 4-1 definiert.

Begriff	Definition
Regler	Der Regler ist eine Person oder ein Gerät, welches die Regelgröße mit der Führungsgröße vergleicht und aus der Differenz eine Stellgröße berechnet.
Regelstrecke	Die Regelstrecke ist das Gerät oder die Anlage, dessen Ausgangsgröße geregelt wird. Dafür wird mindestens eine Eingangsgröße durch den Regler verändert.
Regelgröße x	Die Regelgröße ist die Ausgangsgröße der Regelstrecke.
Führungsgröße w	Die Führungsgröße beschreibt eine der Regelung von außen zugeführte Größe, welcher die Regelgröße folgen soll.
Stellgröße y	Die Stellgröße ist die Ausgangsgröße des Reglers.
Störgröße z	Alle auf die Regelgröße wirkenden Größen mit Ausnahme der Stellgröße sind Störgrößen.

Tabelle 4-1: Definition der verwendeten regelungstechnischen Begriffe basierend auf [DIN09] und [ABE07]

4.2.1 Fahrer-Fahrzeug-Einheit ohne Verkehrsassistenzsystem

Die Grundlage für die Erweiterung der Regelkreise bildet eine Fahrer-Fahrzeug-Einheit ohne Verkehrsassistenzsystem. In dem zugehörigen und in Abbildung 4-1 gezeigten Regelkreis beschreibt U die Eingangsgrößen aus der Umwelt, aus denen ein Fahrer mit der Übertragungsfunktion $G_{F,w}$ seine Führungsgrößen bestimmt. Die Übertragungsfunktion $G_{F,y}$ beschreibt den Fahrer als Regler, welcher die Führungsgrößen in Stellgrößen umrechnet, und G_{Fzg} die Übertragungsfunktion des Fahrzeugs als Regelstrecke. Allgemein definiert eine Übertragungsfunktion die Berechnung des Ausgangssignals basierend auf dem Eingangssignal. z_F beschreibt die Störgrößen, die den Fahrer beeinflussen. Analog dazu entspricht z_{Fzg} den Störgrößen, welche auf die Regelstrecke Fahrzeug wirken. Alternativ zu dem gezeigten Regelkreis kann auch eine Kaskadenstruktur verwendet werden, welcher die Integrierbarkeit von Beschleunigung beziehungsweise der Geschwindigkeit zugrunde liegt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird jedoch aufgrund der Regelgröße Geschwindigkeit und damit der Übertragbarkeit in die mikroskopische Verkehrsflusssimulation die beschriebene Struktur verwendet.

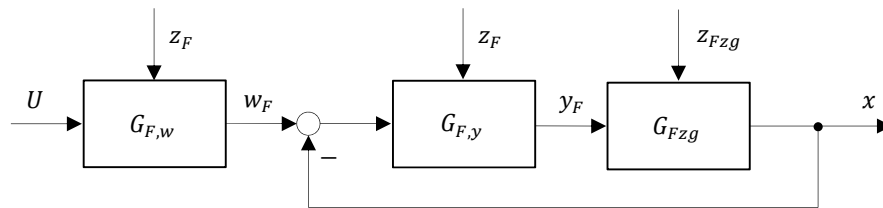


Abbildung 4-1: Regelkreis Fahrer-Fahrzeug ohne Verkehrsassistenzsystem

Dieser Regelkreis wird beispielhaft für eine Folgefahrt erläutert: Basierend auf dem Abstand und der Geschwindigkeit der vorausfahrenden Fahrer-Fahrzeug-Einheit bestimmt der Fahrer die Führungsgröße w_F , seine Wunschgeschwindigkeit. Der Regler „Fahrer“ ermittelt die Abweichung zwischen dieser und der Regelgröße x , der aktuell gefahrenen Geschwindigkeit. Aus der Differenz bestimmt der Fahrer seinen Beschleunigungs- oder Verzögerungswunsch y_F und überträgt diesen an das Fahrzeug. Bei der Bestimmung der korrekten Stellgrößen wird der Fahrer durch Störgrößen z_F wie zum Beispiel das Radio oder eine Unterhaltung mit einem Beifahrer abgelenkt und schätzt dadurch beispielsweise den Abstand oder die Geschwindigkeit falsch ein. Die Folge ist eine Abweichung zwischen der vom Fahrer gewählten und der korrekten Pedalstellung zur Einhaltung seiner Wunschgeschwindigkeit. Die vorgegebene Pedalstellung wird durch das Fahrzeug und dessen Antriebsstrang als Regelstrecke in die entsprechenden Beschleunigungs- oder Verzögerungskräfte gewandelt, die in einer Änderung der Fahrzeuggeschwindigkeit resultieren. Dabei beeinflussen äußere Störgrößen z_{Fzg} wie zum Beispiel Gegenwind deren Umsetzung. Tabelle 4-2 gibt für dieses Beispiel eine Übersicht über die physikalischen Größen des Regelkreises Fahrer-Fahrzeug ohne Verkehrsassistenzsystem. Weitere Störgrößen für Fahrer und Fahrzeug werden unter anderem in [REI10] beschrieben.

Variable	physikalische Größen
w_F	Geschwindigkeit [m/s]
y_F	Wunschbeschleunigung [m/s ²]
x	Geschwindigkeit [m/s]
z_F	z. B. Fehlabschätzung der Geschwindigkeit infolge Ablenkung [m/s]
z_{Fzg}	z. B. Längsverzögerung infolge Gegenwind [m/s]

Tabelle 4-2: Physikalische Größen des Regelkreises Fahrer-Fahrzeug, beispielhaft für die Fahrzeuglängsführung

Die Stellgröße y_F des Reglers „Fahrer“ berechnet sich durch

$$\text{Stellgröße} \quad y_F := G_{F,y} \cdot (w_F - x + z_F) \quad \text{Gleichung 4-1}$$

und die Regelgröße x entsprechend

$$\text{Regelgröße} \quad x := G_{Fzg} \cdot (y_F + z_{Fzg}). \quad \text{Gleichung 4-2}$$

Daraus kann die Regelgröße in Abhängigkeit der Eingangs- und Störgrößen des Fahrers und des Fahrzeugs bestimmt werden:

$$x = \frac{G_{F,y} G_{Fzg}}{1 + G_{F,y} G_{Fzg}} w_F + \frac{G_{F,y} G_{Fzg}}{1 + G_{F,y} G_{Fzg}} z_F + \frac{G_{Fzg}}{1 + G_{F,y} G_{Fzg}} z_{Fzg}. \quad \text{Gleichung 4-3}$$

Diese Funktion beschreibt nach [ZR11] die Abhängigkeit der Regelgröße von der Führungs- und den Störgrößen unter Berücksichtigung aller zum Regler und zur Regelstrecke gehörenden Regelglieder. Die Regelgröße wird durch die Übertragungsfunktion des Fahrers und des Fahrzeugs bestimmt. Dabei haben neben der vom Fahrer berechneten Führungsgröße sowohl dessen Störgrößen als auch die Störgrößen des Fahrzeugs Auswirkungen auf die Regelgröße. Daraus resultiert eine Abweichung zwischen dem Soll der Führungsgröße und dem Ist der Regelgröße.

Die Führungsgröße w_F des Fahrers berechnet sich dabei nach

$$\begin{array}{ll} \text{Führungsgröße} & w_F := G_{F,w} \cdot U. \\ \text{Fahrer} & \end{array} \quad \text{Gleichung 4-4}$$

Für die um Assistenzsysteme erweiterten Regelkreise werden analoge Gleichungen bestimmt und darauf aufbauend die konkrete Umsetzung der Modellkopplung in Abschnitt 4.3 hergeleitet.

4.2.2 Fahrer-Fahrzeug-Einheit mit informierendem Verkehrsassistenzsystem

Wenn die Fahrer-Fahrzeug-Einheit mit einem informierenden Verkehrsassistenzsystem ausgestattet ist, erhält der Fahrer von diesem System Informationen über das verkehrsoptimale Fahrverhalten. Dadurch besitzt der Regler „Fahrer“ die zusätzliche Führungsgröße w_{VAS} gegenüber einem Fahrer ohne Assistenzsystem. Diese Größe kann sowohl die Längs- als auch Querverführung des Fahrers beeinflussen. Die entsprechende Erweiterung des Regelkreises zeigt Abbildung 4-2, dabei beschreibt die Übertragungsfunktion $G_{VAS,w}$ die Bestimmung der Führungsgrößen durch das Assistenzsystem.

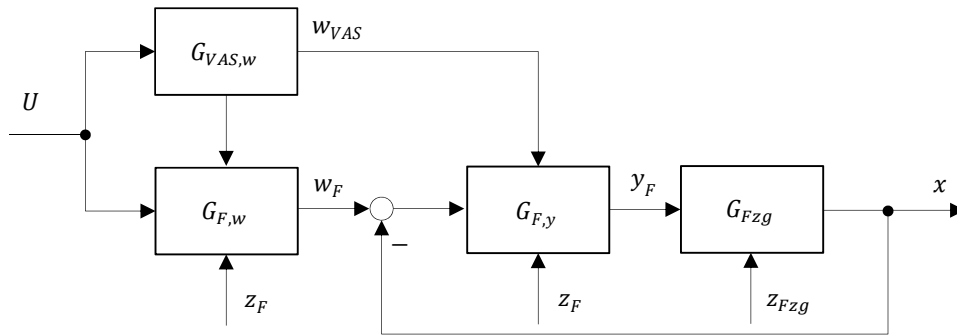


Abbildung 4-2: Regelkreis Fahrer-Fahrzeug mit einem informierenden Verkehrsassistenzsystem

Da Assistenzsysteme im Gegensatz zu menschlichen Fahrern die Berechnungen ohne Ablenkungen von außen durchführen, werden für die Verkehrsassistenzsysteme keine Störgrößen berücksichtigt. Dementsprechend erfolgt die Berechnung der Stellgröße

$$y_F := G_{F,y} \cdot (w_F + w_{VAS} - x + z_F) \quad \text{Gleichung 4-5}$$

unter Berücksichtigung der zusätzlichen Führungsgröße w_{VAS} . Diese berechnet sich nach:

$$\begin{array}{ll} \text{Führungsgröße} & w_{VAS} := G_{VAS,w} \cdot U. \\ \text{Assistenzsystem} & \end{array} \quad \text{Gleichung 4-6}$$

Daraus ergibt sich analog zu Abschnitt 4.2.1 die Regelgröße

$$x = \frac{G_{F,y} G_{Fzg}}{1 + G_{F,y} G_{Fzg}} (w_F + w_{VAS}) + \frac{G_{F,y} G_{Fzg}}{1 + G_{F,y} G_{Fzg}} z_F + \frac{G_{Fzg}}{1 + G_{F,y} G_{Fzg}} z_{Fzg}. \quad \text{Gleichung 4-7}$$

Gegenüber der Gleichung 4-3 zeigt sich, dass durch die Erweiterung des Regelkreises mit einem informierenden Verkehrsassistenzsystem die Regelgröße jetzt von der Führungsgröße des Fahrers und der des Verkehrsassistenzsystems abhängt.

Für die Übertragungsfunktion des Reglers „Fahrer“, welche die Führungsgrößen in Stellgrößen umsetzt, ist dadurch die Funktion

$$G_{F,y}(w_F, w_{VAS}) \quad \text{Gleichung 4-8}$$

zu definieren. Somit ist festzulegen, welche Führungsgröße auf welche Art und Weise durch den Fahrer für die Regelung verwendet wird.

4.2.3 Fahrer-Fahrzeug-Einheit mit agierendem Verkehrsassistenzsystem

Für die Erweiterung der Regelkreise von Fahrer-Fahrzeug-Einheiten durch agierende Verkehrsassistenzsysteme ist zu unterscheiden, ob das Assistenzsystem die Längs- und oder die Querführung übernimmt und welche Fahraufgabe durch den Fahrer ausgeübt wird. Daraus folgen die zu unterscheidenden Varianten:

1. Das Verkehrsassistenzsystem agiert entweder in Längs- oder Querrichtung. Die jeweils andere Führungsaufgabe wird vom Fahrer übernommen. Zusätzlich überwacht der Fahrer das Assistenzsystem. Nach der Klassifikation aus Abschnitt 2.6 entspricht dies einem assistierenden Fahrerassistenzsystem.
2. Sowohl die Längs- als auch die Querführung wird durch das Verkehrsassistenzsystem übernommen, der Fahrer überwacht das System. Dies entspricht einem teilautomatisierten System.
3. Das Assistenzsystem übernimmt sowohl die Längs- als auch Querführung ohne eine Überwachung durch den Fahrer. Ein solches System wird als hochautomatisch klassifiziert.

Der Regelkreis der ersten Variante besitzt mit dem Fahrer und dem Verkehrsassistenzsystem zwei Regler. Dabei wird der Fahrer als „aktiver Regler“ für die Fahraufgabe des Fahrers und als „überwachender Regler“ für die Fahraufgabe des Verkehrsassistenzsystems berücksichtigt. Den daraus resultierenden Regelkreis zeigt Abbildung 4-3.

Dabei beschreibt $G_{F,y}$ die Übertragungsfunktion des aktiven Reglers „Fahrer“ und $G_{F,U,y}$ die des „überwachenden Reglers“. Die Funktion $G_{VAS,y}$ beschreibt den Regler „Verkehrsassistenzsystem“.

Wie in den vorangegangenen Betrachtungen ergibt sich mit der Stellgröße des Assistenzsystems

$$\begin{array}{ll} \text{Stellgröße} & \\ \text{Verkehrsassistenzsystem} & y_{VAS} := G_{VAS,y} \cdot (w_{VAS} - x), \end{array} \quad \text{Gleichung 4-9}$$

der Stellgröße des „überwachenden Reglers“

$$\begin{array}{ll} \text{Stellgröße} & \\ \text{überwachender Regler} & y_{F,U} := G_{F,U,y} \cdot (w_F - x) \end{array} \quad \text{Gleichung 4-10}$$

sowie der Regelgröße

$$x := G_{Fzg} \cdot (y_{VAS} - y_{F,U} + y_F + z_{Fzg}), \quad \text{Gleichung 4-11}$$

deren Abhängigkeit von den Eingangsgrößen und den Störgrößen des Fahrers und des Fahrzeugs:

$$x = \frac{G_{VAS,y} G_{Fzg}}{x_N} w_{VAS} - \frac{G_{F,U,y} G_{Fzg}}{x_N} w_F - \frac{G_{F,U,y} G_{Fzg}}{x_N} z_F + \frac{G_{F,y} G_{Fzg}}{x_N} w_F + \frac{G_{F,y} G_{Fzg}}{x_N} z_F + \frac{G_{Fzg}}{x_N} z_{Fzg}.$$

Gleichung 4-12

Der Nenner x_N entspricht dabei

$$x_N = 1 + G_{VAS,y} G_{Fzg} - G_{F,U,y} G_{Fzg} + G_{F,y} G_{Fzg}. \quad \text{Gleichung 4-13}$$

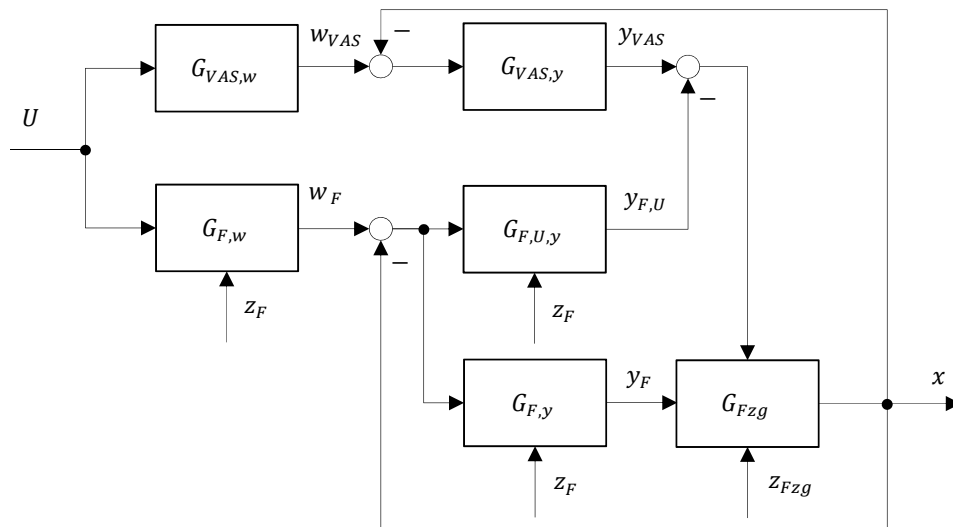


Abbildung 4-3: Regelkreis Fahrer-Fahrzeug mit einem agierenden Verkehrsassistenzsystem, bei dem der Fahrer eine Führungsaufgabe übernimmt und das Assistenzsystem überwacht

Im Gegensatz zu dem Regelkreis mit einem informierenden Verkehrsassistenzsystem muss der Regler „Fahrer“ nur die durch den Fahrer berechneten Führungsgrößen verarbeiten. Darüber hinaus ist in der Übertragungsfunktion des „überwachenden Reglers“ festzulegen, in welchen Situationen der Fahrer, basierend auf seiner Überwachungsfunktion, die aktive Fahrzeugführung des Verkehrsassistenzsystems beendet und dessen Fahraufgabe übernimmt.

Dadurch ist für die Erweiterung des Regelkreises die Funktion

$$G_{F,U,y}(y_{F,U}, y_{VAS}) \quad \text{Gleichung 4-14}$$

zu definieren. Die Führungsgrößen w_{VAS} und w_F ergeben sich analog zu den vorherigen Betrachtungen.

In der zweiten Variante übernimmt das Assistenzsystem die aktive Fahrzeugführung sowohl in Längs- als auch Querrichtung. Der Fahrer wird ausschließlich als „überwachender Regler“ berücksichtigt. Den zugehörigen Regelkreis zeigt Abbildung 4-4.

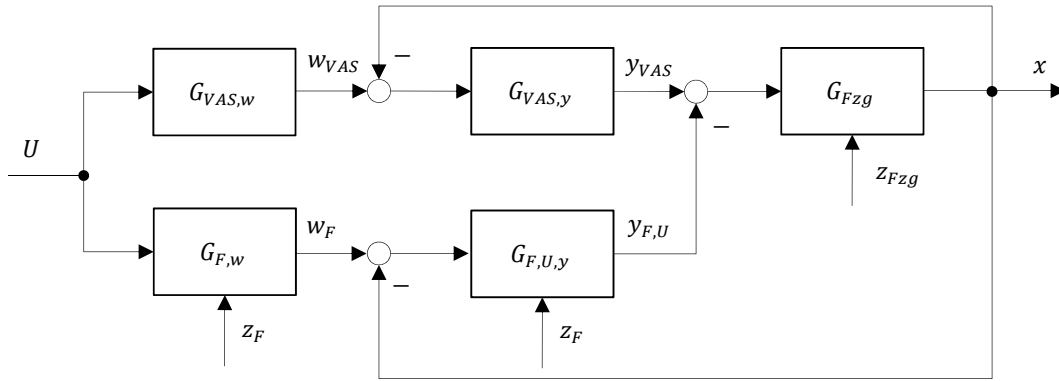


Abbildung 4-4: Regelkreis Fahrer-Fahrzeug mit einem agierenden Fahrerassistenzsystem, bei dem der Fahrer nur die Überwachungsaufgabe übernimmt

Durch den Wegfall der aktiven Fahrzeugregelung des Fahrers ergibt sich für die Regelgröße

$$x = \frac{G_{VAS,y} G_{Fzg}}{x_N} w_{VAS} - \frac{G_{F,U,y} G_{Fzg}}{x_N} w_F - \frac{G_{F,U,y} G_{Fzg}}{x_N} z_F + \frac{G_{Fzg}}{x_N} z_{Fzg} \quad \text{Gleichung 4-15}$$

und für den zugehörigen Nenner

$$x_N = 1 + G_{VAS,y} G_{Fzg} - G_{F,U,y} G_{Fzg}. \quad \text{Gleichung 4-16}$$

Dabei zeigt der Vergleich mit Gleichung 4-12 und Gleichung 4-13, dass die Schnittstelle zwischen überwachendem Fahrer und agierendem Verkehrsassistenzsystem identisch zu der ersten Variante und ebenfalls

$$G_{F,U,y}(y_{F,U}, y_{VAS}) \quad \text{Gleichung 4-17}$$

zu definieren ist. Im Gegensatz zu der ersten Variante ist allerdings zu berücksichtigen, dass durch den Fahrer eine getrennte Übernahme der Fahrzeugführung in Längs- oder Querrichtung erfolgen kann.

In der dritten Variante einer Fahrer-Fahrzeug-Einheit mit einem agierenden Verkehrsassistenzsystem übernimmt der Fahrer keine Kontrollfunktion und ist somit auch kein Bestandteil mehr des Regelkreises, vergleiche Abbildung 4-5.

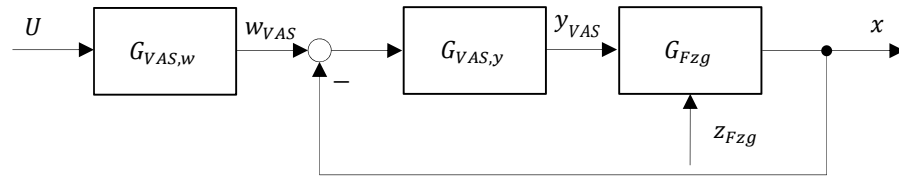


Abbildung 4-5: Regelkreis Fahrer-Fahrzeug mit einem agierenden Fahrerassistenzsystem ohne Überwachung durch den Fahrer

Analog zu den obigen Betrachtungen ergibt sich die dafür Regelgröße:

$$x = \frac{G_{VAS,y} G_{Fzg}}{1 + G_{VAS,y} G_{Fzg}} w_{VAS} + \frac{G_{Fzg}}{1 + G_{VAS,y} G_{Fzg}} z_{Fzg} . \quad \text{Gleichung 4-18}$$

Im Vergleich mit der Gleichung 4-3 des Regelkreises Fahrer-Fahrzeug ohne Verkehrsassistenzsystem zeigt sich, dass nur noch die Störgrößen des Fahrzeugs die Bestimmung der Regelgrößen beeinflussen. Dies bedeutet, dass mögliche Schätzfehler des menschlichen Fahrers oder dessen möglicherweise fehlerbehaftete Regelung keinen Einfluss mehr auf die Regelgrößen haben. Somit kann von einer genaueren Regelung ausgegangen werden, welche das verkehrsoptimale Fahren exakt umsetzt und dadurch nach Kapitel 3 der instabile Verkehrsbe-
reich reduziert werden kann. Neben dem somit größeren verkehrlichen Potenzial haben diese agierenden Systeme den weiteren Vorteil, dass der menschliche Fahrer nicht modelliert werden muss.

4.3 Erweiterung des mikroskopischen Verhaltensmodells

Aus den obigen Regelkreisen Fahrer-Verkehrsassistenzsystem-Fahrzeug wird im Folgenden die konkrete Umsetzung der Kopplung von Verkehrsfluss- mit Assistenzsystemmodellen für deren systematische Untersuchung in einem Simulationswerkzeug abgeleitet. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird die mikroskopische Verkehrsflusssimulation als Basis für die Simulation verwendet. Die Gründe hierfür sind basierend auf Kapitel 2:

1. Im Gegensatz zu mesoskopischen oder makroskopischen Modellen bilden mikroskopische Verkehrsflussmodelle einzelne Fahrer-Fahrzeug-Einheiten ab. Dies ist eine zwingende Voraussetzung für die Simulation einzelner Fahrer-Fahrzeug-Einheiten, die mit einem Verkehrsassistenzsystem ausgestattet sind.
2. Nanoskopische Verkehrsflussmodelle benötigen aufgrund des höheren Detaillierungsgrades im Gegensatz zu mikroskopischen Modellen einen erhöhten Aufwand in der Modellierung und benötigen mehr Rechenzeit in der Simulation, ohne einen Mehrwert hinsichtlich der Bestimmung der Auswirkungen von Assistenzsystemen auf die Verkehrskenngrößen zu leisten.

3. Für die Auslegung und Bewertung von Verkehrsassistenzsystemen ist die Modellierungsgenauigkeit mikroskopischer Modelle ausreichend. Zur Auslegung der Fahrstrategie und deren verkehrlicher Bewertung ist die detaillierte Berücksichtigung beispielsweise eines Motormodells wie in nanoskopischen Modellen nicht notwendig.

Das mikroskopische Verhaltensmodell einer Fahrer-Fahrzeug-Einheit basiert auf den in Abschnitt 2.5 beschriebenen drei Ebenen der Fahrzeugführung. Es umfasst ein Fahrzeugfolgemodell, ein Fahrstreifenwechselmodell und ein Routenwahlmodell.

Für die Modellkopplung wird im Folgenden zunächst der Regelkreis Fahrer-Fahrzeug ohne Verkehrsassistenzsystem auf das mikroskopische Verhaltensmodell übertragen. Darauf aufbauend wird die konkrete Umsetzung der Kopplung von informierenden und agierenden Assistenzsystemen mit dem mikroskopischen Verhaltensmodell einer Fahrer-Fahrzeug-Einheit hergeleitet.

4.3.1 Übertragung des Regelkreises Fahrer-Fahrzeug auf das Verhaltensmodell

Das mikroskopische Verhaltensmodell einer Fahrer-Fahrzeug-Einheit bildet den menschlichen Fahrer in der Simulation ab. Basierend auf den Ausgangs- beziehungsweise Regelgrößen des Verhaltensmodells wird die Fahrer-Fahrzeug-Einheit auf dem in der Simulation modellierten Straßennetz bewegt. Die für die Berechnung der Ausgangs- und Regelgrößen notwendigen Eingangs- und Führungsgrößen sind entweder als Modellparameter abgebildet, werden aus der eigenen Bewegung und den umgebenden Fahrer-Fahrzeug-Einheiten berechnet oder aus dem Verkehrsnetz ermittelt. Im Gegensatz zu den generischen Regelkreisen aus Abschnitt 4.2 wird die Regelstrecke „Fahrzeug“ in einem mikroskopischen Verhaltensmodell nicht berücksichtigt.

Die daraus folgende Übertragung des Regelkreises einer Fahrer-Fahrzeug-Einheit ohne Verkehrsassistenzsystem auf ein mikroskopisches Verhaltensmodell zeigt Abbildung 4-6.

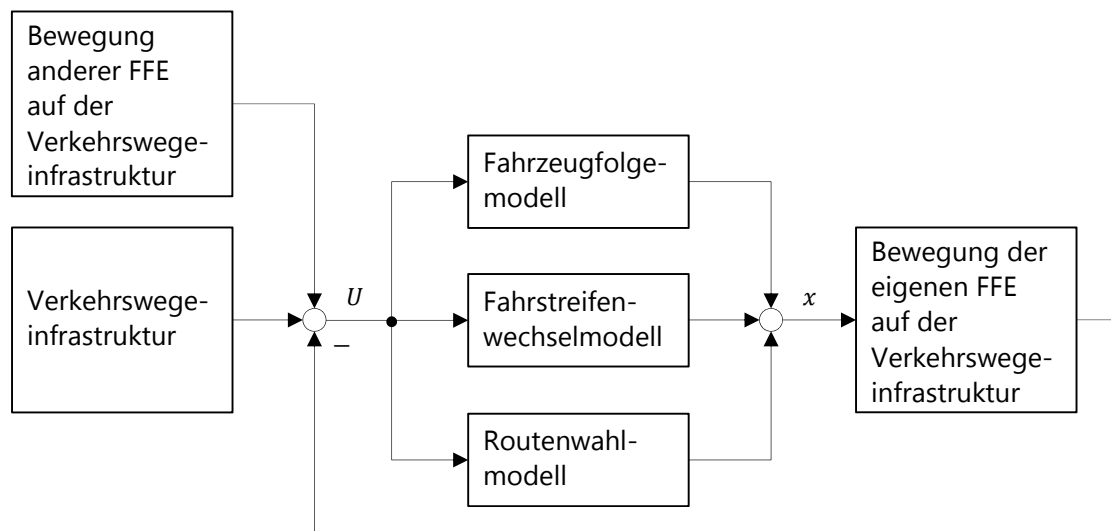


Abbildung 4-6: Regelkreis einer Fahrer-Fahrzeug-Einheit ohne Verkehrsassistenzsystem in einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation

4.3.2 Erweiterung des Verhaltensmodells um informierende Assistenzsysteme

Durch die Erweiterung des Regelkreises Fahrer-Fahrzeug um ein informierendes Verkehrsassistenzsystem besitzt der Regler „Fahrer“ eine weitere Führungsgröße w_{VAS} . Diese kann sowohl das Fahrzeugfolge-, das Fahrstreifenwechsel- als auch das Routenwahlmodell beeinflussen. Für die konkrete Modellkopplung ist basierend auf der Betrachtung der Regelkreise die Funktion

$$G_{F,y}(w_F, w_{VAS}) \quad \text{Gleichung 4-19}$$

zu definieren.

Dafür ist in der Übertragungsfunktion des Reglers „Fahrer“ festzulegen, welche Führungsgröße auf welche Art und Weise für die Regelung verwendet werden soll. Eine beispielhafte Situation hierfür ist: Die Führungsgröße „Wunschgeschwindigkeit“ des Fahrers beträgt $w_F = 50 \text{ km/h}$, durch das Assistenzsystem wird hingegen $w_{VAS} = 40 \text{ km/h}$ empfohlen. Analoge Situationen können sich durch die Beeinflussung auf Fahrstreifenwechsel- oder Routenwahlebene durch das Verkehrsassistenzsystem ergeben.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird für die Modellkopplung eine Befolgungsrate R_B

$$\text{Befolgungsrate} \quad R_B := \begin{cases} 1, & \text{Befolgung der Empfehlung des VAS,} \\ 0, & \text{sonst.} \end{cases} \quad \text{Gleichung 4-20}$$

als Parameter definiert. Dieser Wert ist binär, entweder befolgt der Fahrer die Information oder nicht.

Wenn der Fahrer sein Fahrverhalten aufgrund der Empfehlung eines informierenden Verkehrsassistenzsystems anpasst, wird er dessen Empfehlung gegebenenfalls nicht exakt befolgen. Deshalb wird zusätzlich zu der Befolgungsrate die Befolgungsgenauigkeit G_B als prozentualer Parameter definiert. Eine Genauigkeit von 100 % ($G_B = 1$) bewirkt die exakte Umsetzung durch den Fahrer.

Aus diesen Überlegungen folgt für die resultierende Führungsgröße des Fahrzeugfolgemodells w_{FF} :

$$w_{FF} := \begin{cases} G_B \cdot w_{VAS}, & \text{wenn } R_B = 1, \\ w_F, & \text{sonst.} \end{cases} \quad \text{Gleichung 4-21}$$

Aufgrund der diskreten Entscheidung und Modellierung eines Fahrstreifenwechsels wird die Befolgungsgenauigkeit für das Fahrstreifenwechselmodell nicht verwendet, entweder führt die Fahrer-Fahrzeug-Einheit einen Fahrstreifenwechsel durch oder nicht.

Daher gilt für die sich ergebende Führungsgröße w_{FSW} des Fahrstreifenwechselmodells:

$$w_{FSW} := \begin{cases} w_{VAS}, & \text{wenn } R_B = 1, \\ w_F, & \text{sonst.} \end{cases} \quad \text{Gleichung 4-22}$$

Die befahrene Route kann der Fahrer während der Fahrt analog in Abhängigkeit von der Information des Verkehrsassistenzsystems anpassen. Aufgrund der Komplexität einer alternativen Routenfindung wird im Rahmen dieser Arbeit davon ausgegangen, dass der Fahrer bei dem Befolgen der Empfehlung dieser auch exakt folgt. Da das Routenwahlmodell im Gegensatz zum Fahrzeugfolge- und Fahrstreifenwechselmodell in mikroskopischen Betrachtungen nicht als Regler modelliert wird, ist bei einer Befolgung der Empfehlung die Ausgangsgröße x_{RW} des Routenwahlmodells anzupassen. Daher ergibt sich in Analogie zum Fahrstreifenwechselmodell für die resultierende Route der Fahrer-Fahrzeug-Einheit unter Berücksichtigung der Routenempfehlung des Assistenzsystems $x_{RW,VAS}$ und der geplanten Route des Fahrers $x_{RW,F}$:

$$x_{RW} := \begin{cases} x_{RW,VAS}, & \text{wenn } R_B = 1, \\ x_{RW,F}, & \text{sonst.} \end{cases} \quad \text{Gleichung 4-23}$$

Zusammenfassend zeigt Abbildung 4-7 die Erweiterung des mikroskopischen Verhaltensmodells der Fahrer-Fahrzeug-Einheit mit einem informierenden Verkehrsassistenzsystem, welches beispielhaft das Fahrzeugfolgeverhalten beeinflusst.

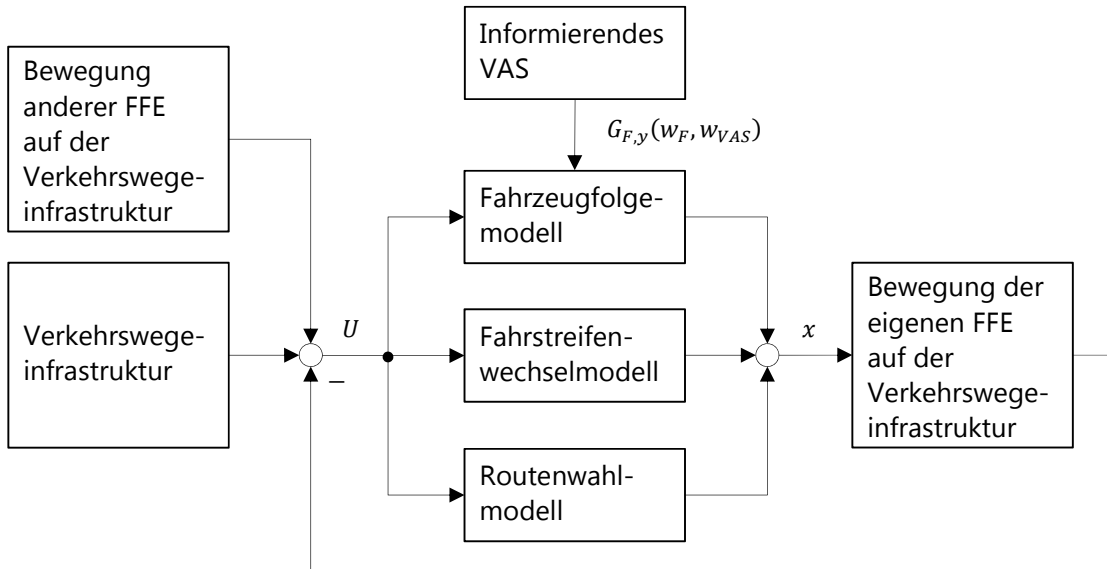


Abbildung 4-7: Regelkreis einer Fahrer-Fahrzeug-Einheit mit einem informierendem Verkehrsassistenzsystem in einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation

Nach Kapitel 3.1 haben Verkehrsassistenzsysteme auf Bahnführungs- und Navigationsebene sowie kommunikationsbasierte Systeme Einfluss auf die Verkehrskenngrößen. Die obige Modellkopplung ermöglicht die systematische Untersuchung aller Ausprägungen, eine Zusammenfassung zeigt Tabelle 4-3.

Ebene des Verkehrsassistenzsystems	Fahrzeugfolge-modell	Fahrstreifen-wechselmodell	Routenwahl-modell
Bahnführungsebene	x	x	
Navigationsebene			x
kommunikationsbasiert	x	x	x

Tabelle 4-3: Verkehrsbeeinflussende Ausprägungen von Verkehrsassistenzsystemen, zugeordnet zu dem mikroskopischen Verhaltensmodell einer Fahrer-Fahrzeug-Einheit

4.3.3 Erweiterung des Verhaltensmodells um agierende Assistenzsysteme

Für die Erweiterung des mikroskopischen Verhaltensmodells mit agierenden Verkehrsassistenzsystemen wurde bei der Erweiterung der Regelkreise zwischen assistierenden, teilautomatischen und hochautomatischen Systemen unterschieden. Dabei hat die Betrachtung gezeigt, dass die ersten beiden Varianten im Sinne der Modellkopplung identisch zu behandeln sind und hierfür die Funktion

$$G_{F,U,y}(y_{F,U}, y_{VAS}) \quad \text{Gleichung 4-24}$$

zu definieren ist.

Bei diesen beiden Varianten ist die Überwachung des Assistenzsystems durch den Fahrer zu modellieren. Eine beispielhafte Situation für eine Übernahme der Fahrzeugführung durch den Fahrer ist: Die aktuell gefahrene Geschwindigkeit beträgt $v_{VAS} = 40 \text{ km/h}$, der Fahrer möchte aber nicht langsamer als $v_F = 50 \text{ km/h}$ fahren. Analoge Situationen können sich bei einer aktiven Querregelung und einer aktiven Routenwahl ergeben.

Im Rahmen dieser Arbeit wird daher das mikroskopische Verhaltensmodell des menschlichen Fahrers mit drei Parametersätzen parallel berechnet. Durch die Ergebnisse wird bestimmt, ob der Fahrer die Fahrzeugführung vom Assistenzsystem übernimmt:

- Der erste Parametersatz wird für die Berechnung einer unteren Akzeptanzschwelle x_{min} des Fahrers verwendet, zum Beispiel für die minimal akzeptierte Geschwindigkeit.
- Der zweite Parametersatz wird für die Berechnung der Ausgangs- und Regelgrößen des Fahrers x_F verwendet, wenn dieser die Fahrzeugführung vom Assistenzsystem übernommen hat.
- Der dritte Parametersatz wird für die Berechnung einer oberen Akzeptanzschwelle x_{max} des Fahrers verwendet, zum Beispiel für die maximal akzeptierte Geschwindigkeit.

Daraus folgt für die resultierenden Ausgangs- und Regelgrößen x :

$$x := \begin{cases} x_{VAS}, & \text{wenn } x_{min} < x_{VAS} < x_{max}, \\ x_F, & \text{sonst.} \end{cases} \quad \text{Gleichung 4-25}$$

Die Erweiterung des mikroskopischen Verhaltensmodells durch ein agierendes Verkehrsassistenzsystem mit einer Überwachung durch den Fahrer zeigt Abbildung 4-8.

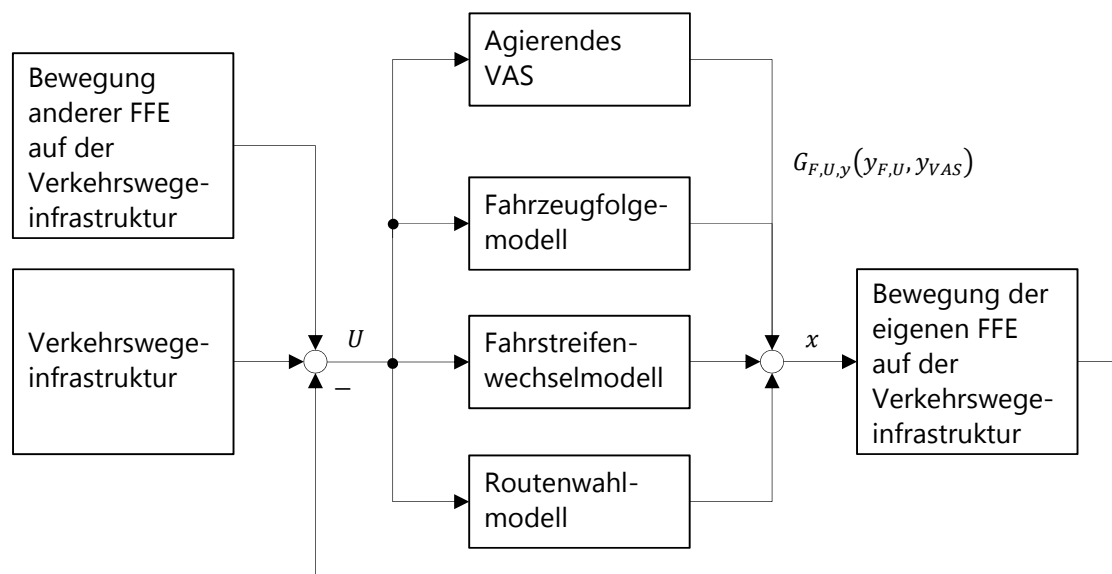


Abbildung 4-8: Regelkreis einer Fahrer-Fahrzeug-Einheit mit einem agierenden Verkehrsassistenzsystem, welches durch den Fahrer überwacht wird, in einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation

In der dritten Variante agierender Verkehrsassistenzsysteme übt der Fahrer keine Überwachungsfunktion aus und ist somit kein Bestandteil mehr des Regelkreises. Dementsprechend wird das mikroskopische Verhaltensmodell des Fahrers durch das Assistenzsystemmodell ersetzt. Die entsprechende Umsetzung zeigt Abbildung 4-9.

In Analogie zu der Erweiterung des mikroskopischen Verhaltensmodells um informierende Verkehrsassistenzsysteme ermöglicht die Modellkopplung von agierenden Systemen die systematische Untersuchung aller verkehrsbeeinflussenden Ausprägungen, vergleiche Tabelle 4-3.

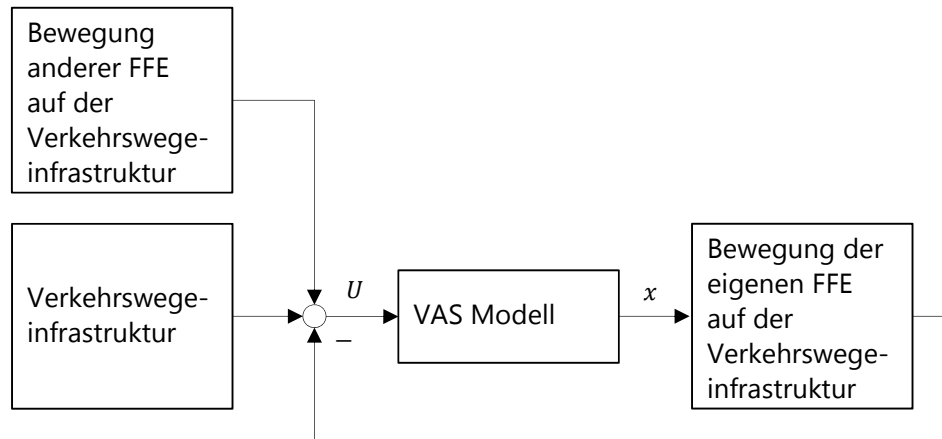


Abbildung 4-9: Regelkreis einer Fahrer-Fahrzeug-Einheit mit einem agierenden Verkehrsassistenzsystem ohne die Überwachung durch den Fahrer in einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation

4.4 Diskussion

Zu Beginn dieses Kapitels wurde die Notwendigkeit einer Simulation zur Auslegung, Untersuchung und Bewertung von Verkehrsassistenzsystemen angeführt. Um eine systematische Simulation der Assistenzsysteme zu ermöglichen, wurde der Regelkreis Fahrer-Fahrzeug in einer theoretischen Betrachtung um Verkehrsassistenzsysteme erweitert. Basierend auf den Ergebnissen wurde die generische Modellkopplung für informierende und agierende Verkehrsassistenzsystemmodelle mit dem mikroskopischen Verhaltensmodell einer Fahrer-Fahrzeug-Einheit abgeleitet.

Für die Modellkopplung von informierenden Systemen wurden die Parameter Befolgungsrate und Befolgungsgenauigkeit definiert. Diese können in der Simulation zwar frei gewählt werden, sollten aber für eine Steigerung der Genauigkeit anhand von Realstudien verifiziert werden. Dies gilt ebenfalls für die zu definierenden Parametersätze im Rahmen der Berechnung der vom Fahrer minimal und maximal akzeptierten Regelgrößen.

Die theoretische Betrachtung der erweiterten Regelkreise zeigt, dass ein agierendes Verkehrsassistenzsystem ohne Überwachung durch den Fahrer aufgrund seiner fehlenden Störgrößen und der exakten Einhaltung der verkehrsoptimalen Fahrstrategie die größten verkehrlichen Auswirkungen hat. Bereits in Kapitel 3 wurde hergeleitet, dass die menschlichen unzulänglichkeiten hinsichtlich Schätzfehlern, Reaktionszeiten und Fahrzeugführung maßgeblich zu Instabilitäten im Verkehrsfluss führen. Jedoch gibt es in der Realität für agierende Systeme Herausforderungen in der Umsetzung, beispielsweise hinsichtlich Objekterkennung und Situationsinterpretation.

Im Gegensatz dazu sind diese Assistenzsysteme in der Simulation einfach zu modellieren, da der menschliche Fahrer nicht abzubilden ist. Bei informierenden Assistenzsystemen verhält es sich genau umgekehrt, die Simulation ist aufgrund der notwendigen Fahrermodellierung komplexer. Eine Umsetzung in der Realität ist hingegen nicht aufwendig, da der Fahrer für die

Fahrzeugführung verantwortlich ist. Allerdings haben solche Systeme in der Praxis durch die Störgrößen des Fahrers und der daraus resultierenden Abweichung von der verkehrsoptimalen Fahrstrategie geringere Auswirkungen auf den Verkehr als agierende Assistenzsysteme.

Es kann daher davon ausgegangen werden, dass Untersuchungen in der Simulation eher für agierende Systeme ohne Überwachung des Fahrers durchgeführt werden, in der Realität aber informierende Verkehrsassistenzsysteme vorherrschen werden. Daraus kann sich eine Abweichung zwischen den Auswirkungen eines Verkehrsassistenzsystems in der Simulation und in der Realität ergeben.

5 Verkehrliche Effizienz des individuellen Fahrverhaltens

Durch das Brems- und Beschleunigungsverhalten sowie die Fahrstreifen- und Routenwahl hat jeder Fahrer Einfluss auf den aktuellen Verkehrsfluss. Anhand dieser Freiheitsgrade wurde in Kapitel 3 die mögliche Beeinflussung der Verkehrskenngrößen durch Verkehrsassistenzsysteme hergeleitet. Im Gegensatz zu beispielsweise einer an einem festen Ort montierten infrastrukturseitigen Verkehrsbeeinflussungsanlage kann ein Fahrer diese Freiheitsgrade entweder zu einem beliebigen Zeitpunkt oder Ort nutzen. Dadurch gibt es verkehrlich effizienteres und weniger effizientes Fahrverhalten in Abhängigkeit von Raum und Zeit. Der Begriff der verkehrlichen Effizienz wird daher in dieser Arbeit als die räumlich-zeitliche Belegung der Straßenfläche durch eine Fahrer-Fahrzeug-Einheit definiert.

Zur Bestimmung dieser Effizienz sind die in Kapitel 2.2 beschriebenen mikro- und makroskopischen Verkehrskenngrößen nicht ausreichend. Diese sind entweder momentane oder lokale Kenngrößen und berücksichtigen weder den zur Verfügung stehenden Raum, also die Straßenfläche, noch die verfügbare Zeit als begrenzendes Maß.

Die wesentlichen Kriterien für die Steuerung des Straßenverkehrs sind die Reisezeit t , der Komfort, gemessen an der Beschleunigung a , sowie der Verbrauch basierend auf der Leistung P . Eine Übersicht nach [SCH07] ist in Tabelle 5-1 dargestellt. Eine Optimierung des Verkehrs hinsichtlich der Kriterien wird entweder isoliert durch einzelne Fahrer-Fahrzeug-Einheiten oder für das gesamte Verkehrskollektiv durchgeführt. Keines dieser Gütekriterien ermöglicht jedoch eine Aussage über die verkehrliche Effizienz des individuellen Fahrverhaltens entsprechend der obigen begrifflichen Definition.

Gütekriterium	Individualbetrachtung	Kollektivbetrachtung
Reisezeit	$\int_{s_{Start}}^{s_{Ziel}} dt \rightarrow \min$	Verkehrsverfügbarkeit
Komfort	$\int_{s_{Start}}^{s_{Ziel}} a^2 dt \rightarrow \min$	Gleichmäßigkeit
Verbrauch / Emission	$\int_{s_{Start}}^{s_{Ziel}} P dt \rightarrow \min$	Kraftstoffverbrauch

Tabelle 5-1: Kriterien für die Steuerung des Straßenverkehrs nach [SCH07]

Weder die mikro- noch die makroskopischen Verkehrskenngrößen oder die bisher zur Steuerung des Straßenverkehrs verwendeten Gütekriterien ermöglichen eine Bewertung der verkehrlichen Effizienz unter räumlichen und zeitlichen Gesichtspunkten. Hierfür wird in diesem Kapitel ein neues Kriterium hergeleitet. Anhand des neuen Gütekriteriums kann beschrieben werden, welcher Anteil der zur Verfügung stehenden räumlich-zeitlichen Straßenfläche eines Streckenabschnitts von einer Fahrer-Fahrzeug-Einheit belegt wird. Dadurch kann das indivi-

duelle Fahrverhalten hinsichtlich der Verkehrseffizienz bewertet und optimiert werden. Im Gegensatz zu den bisherigen Kriterien können die Auswirkungen eines individuell veränderten Fahrverhaltens auf den Verkehr abgeschätzt und somit zusätzlich eine Aussage über den maximal möglichen Verkehrsfluss getroffen werden. Basierend auf der Bewertungskenngröße und des Fundamentaldiagramms werden abschließend mögliche Einsatzgebiete für Verkehrsassistenzsysteme identifiziert.

5.1 Herleitung einer Bewertungskenngröße

Eine Fahrer-Fahrzeug-Einheit belegt zu jedem Zeitpunkt t die Straßenfläche $f_b(t)$. Diese wird in Gleichung 5-1 zunächst als das Produkt der Straßenbelegung in Längs- und Querrichtung definiert:

$$\begin{array}{l} \text{belegte} \\ \text{Straßenfläche} \end{array} \quad f_b(t) := s_{b,l\ddot{a}ngs}(t) \cdot s_{b,quer}(t) . \quad \text{Gleichung 5-1}$$

$$\begin{array}{ll} s_{b,l\ddot{a}ngs}(t) & \text{Straßenbelegung in Längsrichtung zum Zeitpunkt } t \\ s_{b,quer}(t) & \text{Straßenbelegung in Querrichtung zum Zeitpunkt } t \end{array}$$

Die Straßenbelegung in Längsrichtung setzt sich dabei aus der Fahrzeuglänge sowie dem Stillstands- und Sicherheitsabstand zusammen. Der Stillstandsabstand bezeichnet den im Stand eingehaltenen Abstand zur vorausstehenden Fahrer-Fahrzeug-Einheit. Der Sicherheitsabstand wird im Folgenden entsprechend der Umsetzung in einem Adaptive Cruise Control-System durch das Produkt der vom Fahrer gewählten Zeitlücke zur vorausfahrenden Fahrer-Fahrzeug-Einheit und der zum Zeitpunkt t gefahrenen Geschwindigkeit definiert. In der Folgenden Beschreibung wird die gewählte Zeitlücke als Konstante betrachtet. Für die Straßenbelegung in Längsrichtung ergibt sich somit eine geschwindigkeitsabhängige Formulierung:

$$s_{l\ddot{a}ngs}(t, v(t)) := t_{\text{Zeitlücke}} \cdot v(t) , \quad \text{Gleichung 5-2}$$

$$s_{b,l\ddot{a}ngs}(t, v(t)) := s_{l\ddot{a}ngs}(t, v(t)) + s_{0,l\ddot{a}ngs} + l_{Fzg} . \quad \text{Gleichung 5-3}$$

$$\begin{array}{ll} s_{l\ddot{a}ngs}(t, v(t)) & \text{Sicherheitsabstand in Längsrichtung zum Zeitpunkt } t \\ t_{\text{Zeitlücke}} & \text{Zeitlücke zur vorausfahrenden Fahrer-Fahrzeug-Einheit} \\ v(t) & \text{Geschwindigkeit zum Zeitpunkt } t \\ s_{0,l\ddot{a}ngs} & \text{Stillstandsabstand in Längsrichtung} \\ l_{Fzg} & \text{Fahrzeuglänge} \end{array}$$

Die Straßenbelegung in Querrichtung setzt sich analog zur Längsrichtung aus der Fahrzeugbreite sowie dem Stillstands- und Sicherheitsabstand zusammen. Der obige Ansatz ist dabei universell für die Betrachtung der belegten Straßenfläche in Längs- und Querrichtung verwendbar, auch für nicht fahrstreifengebundenen Verkehr oder sehr schmale Fahrzeuge wie zum Beispiel Motorräder. Im Rahmen dieser Arbeit wird der laterale Sicherheitsabstand als geschwindigkeitsunabhängige Konstante und ein Fahrzeug pro Fahrstreifen angenommen.

Somit wird definiert:

$$s_{b,quer} := s_{quer} + s_{0,quer} + b_{Fzg} . \quad \text{Gleichung 5-4}$$

s_{quer}	Sicherheitsabstand in Querrichtung
$s_{0,quer}$	Stillstandsabstand in Querrichtung
b_{Fzg}	Fahrzeugbreite

Zur Vereinfachung der Notation wird die Summe aus dem Stillstands- und Sicherheitsabstand von der linken und rechten Fahrzeugseite zur jeweiligen Fahrstreifenmarkierung als $s_{quer,ges}$ zusammengefasst, d. h.:

$$s_{quer,ges} := s_{quer} + s_{0,quer} . \quad \text{Gleichung 5-5}$$

Daraus folgt:

$$s_{b,quer} = s_{quer,ges} + b_{Fzg} . \quad \text{Gleichung 5-6}$$

Abbildung 5-1 zeigt die Straßenbelegung einer Fahrer-Fahrzeug-Einheit in Fahrzeuglängs- und -querrichtung zum Zeitpunkt t .

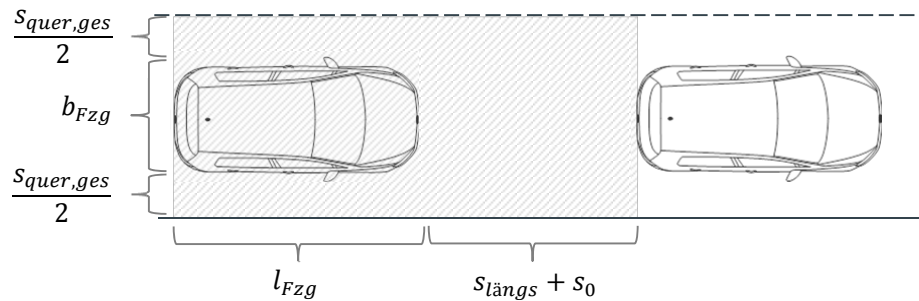


Abbildung 5-1: Straßenbelegung einer Fahrer-Fahrzeug-Einheit

Für die Geschwindigkeit $v(t) < 0$ sind obige Gleichungen analog zu verstehen. Der Sicherheitsabstand liegt dann ebenfalls in Fahrtrichtung, jedoch aufgrund der Rückwärtsfahrt hinter dem Fahrzeugheck. Da die effektiv belegte Straßenfläche nicht negativ werden kann, ist bei Bedarf formal zu redefinieren:

$$v(t) := |v(t)| . \quad \text{Gleichung 5-7}$$

Aufgrund der bisherigen Erkenntnisse ist es zielführend, die Definition von $f_b(t)$ in Gleichung 5-1 unter Berücksichtigung der Geschwindigkeit zu konkretisieren.

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird daher die wie folgt definierte belegte Straßenfläche $f_b(t, v(t))$ verwendet:

$$\begin{array}{ll} \text{belegte} & \\ \text{Straßenfläche} & f_b(t, v(t)) := s_{0,l\ddot{a}ngs}(t, v(t)) \cdot s_{b,quer} . \end{array} \quad \text{Gleichung 5-8}$$

Konkret ergibt sich:

$$f_b(t, v(t)) = (t_{\text{Zeitlücke}} \cdot v(t) + s_{0,l\ddot{a}ngs} + l_{Fzg}) \cdot (s_{quer,ges} + b_{Fzg}) , \quad \text{Gleichung 5-9}$$

wobei im Rahmen dieser Herleitung

$$s_{0,l\ddot{a}ngs} + l_{Fzg} = konst \quad \text{Gleichung 5-10}$$

angenommen wird. Jeder Fahrer kann also durch die Anpassung seiner Geschwindigkeit $v(t)$ die von ihm belegte Straßenfläche reduzieren oder vergrößern. Aus Gleichung 5-9 ist ersichtlich, dass die effektiv belegte Straßenfläche $f_b(t, v(t))$ aufgrund des geschwindigkeitsabhängigen Sicherheitsabstandes in Längsrichtung linear mit der Geschwindigkeit wächst. Eine Grenzwertanalyse zu einem beliebigen, aber fixen Zeitpunkt t^* zeigt:

$$\lim_{v(t^*) \rightarrow 0} f_b(t^*, v(t^*)) = (s_{0,l\ddot{a}ngs} + l_{Fzg}) \cdot (s_{quer,ges} + b_{Fzg}) = f_b(t^*, 0) \quad \text{Gleichung 5-11}$$

sowie

$$\lim_{v(t^*) \rightarrow +\infty} f_b(t^*, v(t^*)) = \infty . \quad \text{Gleichung 5-12}$$

Die theoretische maximale Verkehrskapazität C kann dabei durch

$$C = \frac{\partial f_b(t, v(t))}{\partial t} \quad \text{Gleichung 5-13}$$

abgeschätzt werden. Die Kenngröße der belegten Straßenfläche $f_b(t, v(t))$ berücksichtigt aber nicht, dass die belegte Fläche bei höherer Geschwindigkeit schneller wieder durch folgende Fahrer-Fahrzeug-Einheiten befahren werden kann. Demnach ist im Rahmen der Steigerung der verkehrlichen Effizienz des individuellen Fahrverhaltens nicht nur die belegte Straßenfläche zu einem fixen Zeitpunkt von Bedeutung. Vielmehr ist es aufgrund der schnelleren Wiederverfügbarkeit von Interesse, die während der Durchfahrt eines konkreten Streckenabschnitts belegte Straßenfläche zu betrachten.

Der im Weiteren betrachtete Streckenabschnitt beginnt am Ort s_1 und endet am Ort s_2 , dabei bezeichnet im Folgenden $t(s_1)$ den Zeitpunkt der Einfahrt sowie $t(s_2)$ den Zeitpunkt der Ausfahrt aus diesem fixierten Streckenabschnitt.

Für die Plausibilisierung des weiteren Vorgehens werden in dem betrachteten Streckenabschnitt Messpunkte angenommen, an denen die belegte Straßenfläche gemessen beziehungsweise anhand von vorgenommenen Messungen errechnet wird. Die Zeitpunkte der Passage einer Messstelle werden aufsteigend mit t_i bezeichnet:

$$t(s_1) = t_0 < t_1 < t_2 < \dots < t_n = t(s_2). \quad \text{Gleichung 5-14}$$

Eine Berechnung der zu jedem Zeitpunkt t_i benötigten Straßenfläche erfordert entsprechend Gleichung 5-9 lediglich die Kenntnis des Zeitpunkts t_i sowie die zu diesem Zeitpunkt beziehungsweise an der entsprechenden Messstelle gefahrene Geschwindigkeit.

Als Schätzwert für die während der gesamten Durchfahrt des Streckenabschnitts belegte Straßenfläche können daher zum Beispiel Riemann-Summen wie

$$\sum_{j=0}^{n-1} f_b(t_j, v(t_j)) \cdot (t_{j+1} - t_j) \quad \text{Gleichung 5-15}$$

oder

$$\sum_{j=0}^{n-1} f_b(t_j, v(t_{j+1})) \cdot (t_{j+1} - t_j) \quad \text{Gleichung 5-16}$$

angegeben werden. Deren Prinzip wird in Abbildung 5-2 an einem beispielhaften Geschwindigkeitsverlauf $v(t)$ verdeutlicht.

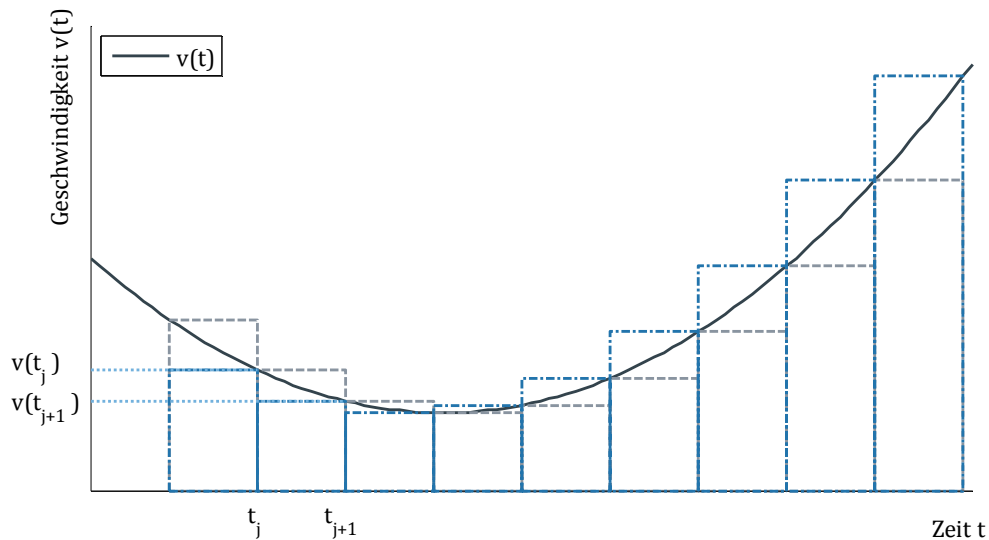


Abbildung 5-2: Berechnung der belegten Straßenfläche anhand von Riemann-Summen während der Durchfahrt eines fixierten Streckenabschnitts

Ist hingegen der Verlauf der Geschwindigkeit zu jedem Zeitpunkt und nicht nur in den Messpunkten bekannt, kann basierend auf der Integrierbarkeit der Geschwindigkeit zur Integralrechnung übergegangen werden. Die räumlich-zeitlich belegte Straßenfläche kann daher wie folgt definiert werden:

räumlich-zeitlich belegte Straßenfläche $F_b(t, v(t)) := \int_{t(s_1)}^{t(s_2)} f_b(t, v(t)) dt$. Gleichung 5-17

Durch die Berücksichtigung der für die Durchfahrt des Streckenabschnitts benötigten Zeit und der dabei belegten Straßenfläche werden die beiden zu Beginn angesprochenen verkehrsbegrenzenden Randbedingungen Raum und Zeit berücksichtigt.

Im Folgenden wird die Kenngröße der räumlich-zeitlich belegten Straßenfläche näher betrachtet. Sie berechnet sich aufgrund der Definition von $f_b(t, v(t))$ zu:

$$F_b(t, v(t)) = (s_{quer, ges} + b_{Fzg}) \cdot (s_{0, längs} + l_{Fzg}) \cdot (t(s_2) - t(s_1)) \\ + (s_{quer, ges} + b_{Fzg}) \cdot t_{Zeitlücke} \cdot \int_{t(s_1)}^{t(s_2)} v(t) dt .$$
 Gleichung 5-18

Unabhängig vom Verlauf der Geschwindigkeit gilt allerdings

$$\int_{t(s_1)}^{t(s_2)} v(t) dt = s_2 - s_1 ,$$
 Gleichung 5-19

jedoch werden dadurch unterschiedliche individuelle Verläufe der Geschwindigkeit in dem betrachteten Streckenabschnitt nicht berücksichtigt. Aus der im betrachteten Zeitabschnitt gefahrenen mittleren Geschwindigkeit

mittlere Geschwindigkeit $\bar{v} := \frac{s_2 - s_1}{t(s_2) - t(s_1)}$ Gleichung 5-20

ergibt sich für die im Mittel räumlich-zeitlich belegte Straßenfläche

$$F_b(t, v(t)) = (s_{quer, ges} + b_{Fzg}) \cdot (s_{0, längs} + l_{Fzg}) \cdot \left(\frac{s_2 - s_1}{\bar{v}} \right) \\ + (s_{quer, ges} + b_{Fzg}) \cdot t_{Zeitlücke} \cdot (s_2 - s_1) .$$
 Gleichung 5-21

Anstelle der Variablen t und $v(t)$ hängt $F_b(t, v(t))$ folglich nur noch von der mittleren Geschwindigkeit \bar{v} ab, mit welcher im betrachteten Streckenabschnitt gefahren wurde. Daher kann im vorliegenden Modell $F_b(t, v(t))$ auch durch

$$F_b(t, v(t)) := F_b(\bar{v}) \quad \text{Gleichung 5-22}$$

definiert werden. Dadurch hängt F_b nur noch von einer reellen Variablen ab, was die weiteren Untersuchungen vereinfacht. Dabei kann ohne Einschränkung $\bar{v} > 0$ angenommen werden. Aufgrund der Betrachtung der mittleren Geschwindigkeit sind in dem vorliegenden Modell jedoch keine lokalen Effekte mehr beschreibbar, wie zum Beispiel eine lokal hohe Verkehrsdichte.

Dann gilt

$$F'_b \left(\frac{\partial F_b}{\partial \bar{v}} \right) := F'_b(\bar{v}) = (s_{quer, ges} + b_{Fzg}) \cdot (s_{0, längs} + l_{Fzg}) \cdot \left(\frac{s_2 - s_1}{-\bar{v}^2} \right) < 0, \quad \text{Gleichung 5-23}$$

das heißt $F_b(\bar{v})$ ist monoton fallend in \bar{v} und eine Grenzwertbetrachtung zeigt

$$\lim_{\bar{v} \rightarrow 0} F_b(\bar{v}) = \infty \quad \text{Gleichung 5-24}$$

sowie

$$\lim_{\bar{v} \rightarrow +\infty} F_b(\bar{v}) = (s_{quer, ges} + b_{Fzg}) \cdot (t_{zeitlücke} \cdot (s_2 - s_1)). \quad \text{Gleichung 5-25}$$

Die folgende Abbildung 5-3 zeigt die räumlich-zeitlich belegte Straßenfläche während der Durchfahrt eines fixierten Streckenabschnitts in Abhängigkeit von der mittleren Geschwindigkeit. Die exemplarisch verwendeten Parameter sind $l_{Fzg} = 5 \text{ m}$, $s_{0, längs} = 1 \text{ m}$, $b_{Fzg} = 2 \text{ m}$, $s_{quer, ges} = 2 \text{ m}$, $t_{zeitlücke} = 1 \text{ s}$ und $s_2 - s_1 = 1000 \text{ m}$.

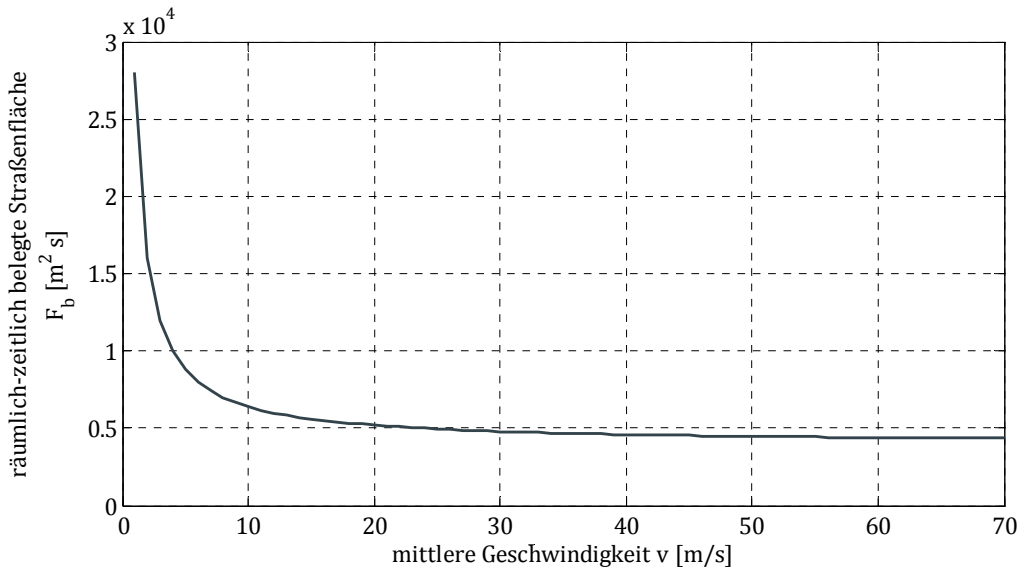


Abbildung 5-3: Räumlich-zeitlich belegte Straßenfläche F_b für einen fixierten Streckenabschnitt in Abhängigkeit der mittleren Geschwindigkeit \bar{v}

Aus der obigen Herleitung folgt, dass das individuelle Fahrverhalten mit zunehmender mittlerer Geschwindigkeit weniger räumlich-zeitliche Straßenfläche beansprucht und somit den Verkehrsfluss steigert. Dies beschreibt das im hergeleiteten Modell optimale individuelle Verhalten. Aufgrund der Wechselwirkungen mit umgebenden Fahrer-Fahrzeug-Einheiten und der gesetzlichen Vorgaben ist dieses Verhalten in der Realität allerdings nicht immer umsetzbar.

Insbesondere ist die nicht-lineare Abhängigkeit von der mittleren Geschwindigkeit zu betonen. Da formal

$$\lim_{\bar{v} \rightarrow +\infty} F_b''(\bar{v}) = 0 \quad \text{Gleichung 5-26}$$

und für alle $\bar{v} > 0$

$$F_b''(\bar{v}) > 0 \quad \text{Gleichung 5-27}$$

gilt, hat dieselbe Steigerung der mittleren Geschwindigkeit um einen absoluten Wert bei kleineren Geschwindigkeiten eine größere Auswirkung auf die Reduktion der räumlich-zeitlich belegten Straßenfläche als bei hohen Geschwindigkeiten. Dementsprechend ist eine Optimierung insbesondere in Bereichen mit häufigen Stopps oder sehr langsamen Geschwindigkeiten sinnvoll. Daher werden solche Situationen in den beiden Anwendungsbeispielen in Kapitel 7 adressiert.

Wenn mehrere Fahrzeuge ihre Geschwindigkeit v an einem fixen Ort erhöhen, wird dort die gemittelte lokale Geschwindigkeit \bar{v}_l gesteigert. Dies hat Auswirkungen auf den Verkehrsfluss (basierend auf Gleichung 3-1)

$$q = \frac{3600 \text{ s/h}}{t_{\text{Zeitlücke}} + \frac{l_{\text{Fzg}}}{\bar{v}_l}}. \quad \text{Gleichung 5-28}$$

Dieser steigt nicht-linear über der mittleren lokalen Geschwindigkeit, vergleiche Abbildung 5-4. Daher bewirkt die Erhöhung der Durchschnittsgeschwindigkeit insbesondere in geringen Geschwindigkeitsbereichen sowohl eine signifikante Reduktion der räumlich-zeitlich belegten Straßenfläche als auch eine deutliche Steigerung des Verkehrsflusses.

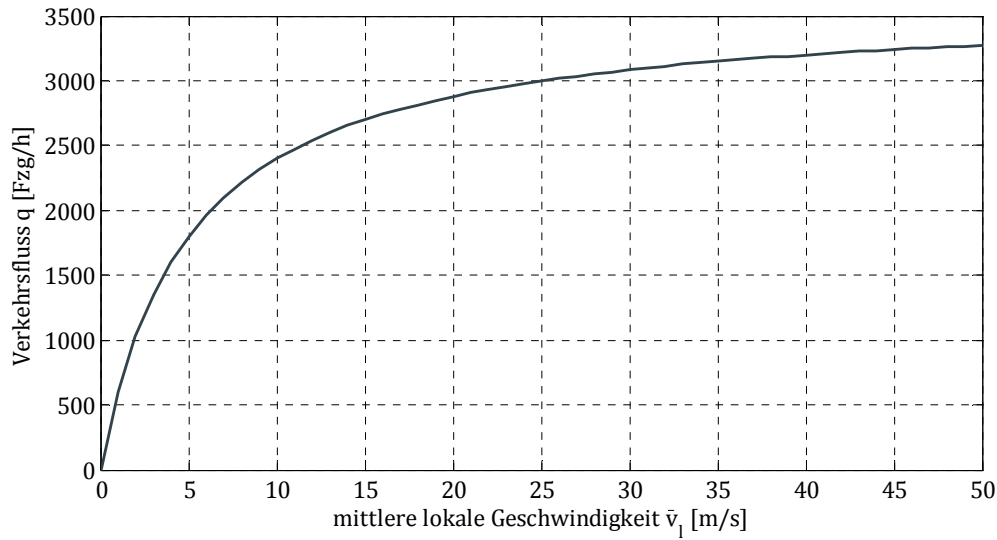


Abbildung 5-4: Verkehrsfluss q in Abhängigkeit der mittleren lokalen Geschwindigkeit \bar{v}_l

5.2 Verkehrliche Optimierung des individuellen Fahrverhaltens

Basierend auf der räumlich-zeitlich belegten Straßenfläche $F_b(\bar{v})$ für die Durchfahrt eines definierten Streckenabschnitts wird im Folgenden eine Methode für die verkehrliche Optimierung des individuellen Fahrverhaltens hergeleitet.

Es können umso mehr Fahrer-Fahrzeug-Einheiten in einem bestimmten Zeitintervall den fixierten Streckenabschnitt durchfahren, je weniger räumlich-zeitliche Straßenfläche durch eine Fahrer-Fahrzeug-Einheit belegt wird. Das Ziel einer verkehrlichen Optimierung des individuellen Fahrverhaltens ist demnach die Reduzierung der durch eine Fahrer-Fahrzeug-Einheit belegten räumlich-zeitlichen Fläche $F_b(\bar{v})$.

Aus den Betrachtungen in Abschnitt 5.1 folgt, dass für die Minimierung von $F_b(\bar{v})$ die mittlere Geschwindigkeit \bar{v} während der Durchfahrt durch den fixierten Streckenabschnitt zu maximieren ist. Eine Geschwindigkeitserhöhung wird jedoch durch die auf dem Streckenabschnitt geltenden gesetzlichen Randbedingungen begrenzt. Diese sind beispielsweise der Sicherheitsabstand zu vorausfahrenden Fahrer-Fahrzeug-Einheiten, die Einhaltung der maximal erlaubten Geschwindigkeit sowie die Berücksichtigung von Lichtsignalanlagen. Verkehrsassistenzsysteme müssen solche Bedingungen wie jeder Fahrer im Rahmen der Straßenverkehrsordnung einhalten.

Für die verkehrliche Optimierung und damit für die Steigerung der mittleren Geschwindigkeit \bar{v} während der Durchfahrt des betrachteten Streckenabschnitts sind alle Parameter p_i des Verkehrsassistenzsystems sowie deren zugehörigen Untergrenzen a_i und Obergrenzen b_i zu bestimmen, die das individuelle Fahrverhalten beeinflussen:

$$\begin{array}{c} a_1 \leq p_1 \leq b_1 \\ \vdots \\ a_n \leq p_n \leq b_n \end{array} \quad \text{Gleichung 5-29}$$

Die Grenzen sind dabei durch gesetzliche Vorgaben sowie technische, Sicherheits- und Komfortanforderungen definiert.

Aus der Kombination der Parameter und deren Variation innerhalb der festgelegten Grenzen ergeben sich m Parametersätze:

$$P_1 := \begin{pmatrix} a_1 \leq p_{1,1} \leq b_1 \\ \vdots \\ a_n \leq p_{n,1} \leq b_n \end{pmatrix}, \quad \dots, \quad P_m := \begin{pmatrix} a_1 \leq p_{1,m} \leq b_1 \\ \vdots \\ a_n \leq p_{n,m} \leq b_n \end{pmatrix}. \quad \text{Gleichung 5-30}$$

Die daraus folgende Menge aller Parametersätze wird als

$$P = \{P_1, \dots, P_m\} \quad \text{Gleichung 5-31}$$

bezeichnet. Für die Bestimmung der maximalen mittleren Geschwindigkeit und damit dem der Kenngröße entsprechenden optimalen Fahrverhalten sind alle Parametersätze des Verkehrsassistenzsystems aus der Menge P zu simulieren. Dadurch werden während der Optimierung alle oben genannten Randbedingungen wie zum Beispiel Geschwindigkeitsbegrenzungen eingehalten, die in dem Simulationsszenario enthalten sind.

Für die mit dem konkreten Parametersatz P^* bestimmte maximale mittlere Geschwindigkeit \bar{v}_{P^*} einer Fahrer-Fahrzeug-Einheit ist die räumlich-zeitlich belegte Straßenfläche $F_{b,P^*}(\bar{v}_{P^*})$ basierend auf der Herleitung in Abschnitt 5.1 zu berechnen. Dieser Parametersatz P^* ermöglicht im Sinne des hergeleiteten Modells das verkehrsoptimale Fahrverhalten. Abbildung 5-5 fasst die beschriebenen Schritte zusammen.

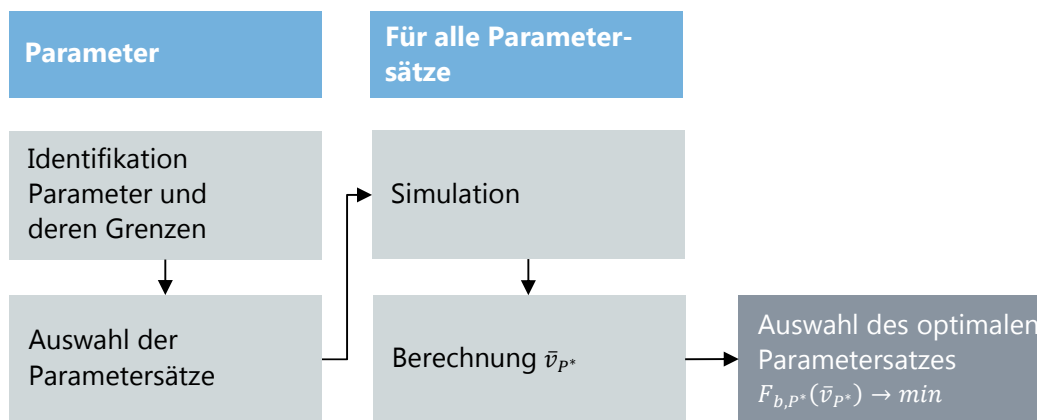


Abbildung 5-5: Verkehrliche Optimierung des individuellen Fahrverhaltens einer Fahrer-Fahrzeug-Einheit

Das Fahrverhalten mit der geringsten räumlich-zeitlich belegten Straßenfläche wird in den folgenden Abschnitten auch als das optimale Fahrverhalten bezeichnet, welches die räumlich-zeitliche Straßenfläche $F_{b,opt}(\bar{v}_{opt})$ belegt.

5.3 Bewertung der verkehrlichen Effizienz

Nach der Optimierung ist das individuelle Fahrverhalten hinsichtlich der verkehrlichen Effizienz zu bewerten. Hierfür werden im Rahmen dieser Arbeit sowohl eine störungsfrei fahrende als auch eine Fahrer-Fahrzeug-Einheit mit dem Status Quo (SQ) Fahrverhalten ohne Verkehrsassistenzsystem verwendet.

Die störungsfrei fahrende Fahrer-Fahrzeug-Einheit repräsentiert das ideale Fahren und durchfährt den Streckenabschnitt konstant mit der maximal gesetzlich erlaubten Geschwindigkeit v_{max} und belegt dadurch die räumlich-zeitliche Straßenfläche $F_{b,ideal}(\bar{v}_{max})$. Diese Fahrer-Fahrzeug-Einheit berücksichtigt somit keine Störungen wie beispielsweise andere Fahrer-Fahrzeug-Einheiten oder rote Lichtsignalanlagen. Das Status Quo Verhalten ist weder optimiert noch idealisiert und berücksichtigt alle Störungen und gesetzlichen Randbedingungen auf dem betrachteten Streckenabschnitt.

Für die Effizienzbewertung basierend auf dem idealen Fahrverhalten wird der Quotient $Q_{ideal}(\bar{v}_{opt}, \bar{v}_{max})$ aus der räumlich-zeitlich belegten Straßenfläche des zu bewertenden Fahrverhaltens $F_{b,opt}(\bar{v}_{opt})$ und des idealisierten individuellen Fahrverhaltens $F_{b,ideal}(\bar{v}_{max})$ gebildet:

Bewertungsquotient
basierend auf dem
idealem Fahrverhalten

$$Q_{ideal}(\bar{v}_{opt}, \bar{v}_{max}) = \frac{F_{b,opt}(\bar{v}_{opt})}{F_{b,ideal}(\bar{v}_{max})}.$$

Gleichung 5-32

Je größer $Q_{ideal}(\bar{v}_{opt}, \bar{v}_{max})$ ist, desto verkehrlich effizienter ist das individuelle Fahrverhalten im Sinne des Modells. Abbildung 5-6 fasst die Bewertung der verkehrlichen Effizienz des individuellen Fahrverhaltens auf Grundlage auf einer störungsfrei fahrenden Fahrer-Fahrzeug-Einheit zusammen.

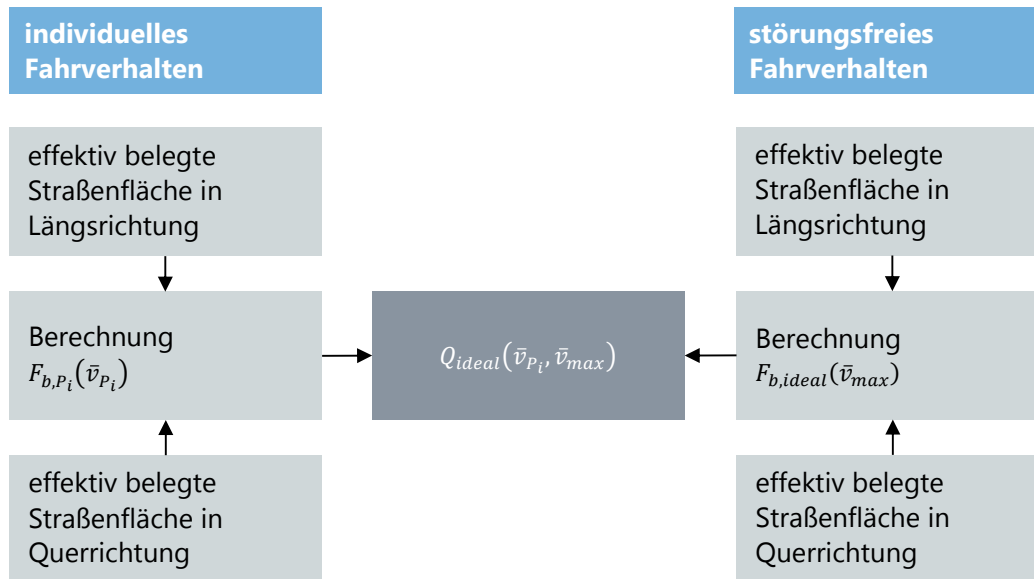


Abbildung 5-6: Verkehrliche Effizienzbewertung des individuellen Fahrverhaltens basierend auf dem idealen Fahrverhalten

Für die Bewertung basierend auf dem menschlichen Status Quo Fahrverhalten ohne Verkehrsassistenzsystem ist die zugehörige Durchschnittsgeschwindigkeit \bar{v}_{SQ} in der Simulation zu bestimmen. Dadurch belegt eine Fahrer-Fahrzeug-Einheit die räumlich-zeitliche Straßenfläche $F_{b,SQ}(\bar{v}_{SQ})$, der Bewertungsquotient ergibt sich aus

Bewertungsquotient basierend auf dem Status Quo Fahrverhalten

$$Q_{SQ}(\bar{v}_{opt}, \bar{v}_{SQ}) := \frac{F_{b,opt}(\bar{v}_{opt})}{F_{b,SQ}(\bar{v}_{SQ})}. \quad \text{Gleichung 5-33}$$

Da das optimale Fahren keine Störungen wie beispielsweise rote Lichtsignalanlagen berücksichtigt, gilt immer

$$Q \leq 1. \quad \text{Gleichung 5-34}$$

In der Realität ist das optimale Fahren aufgrund der gesetzlichen Rahmenbedingungen nicht umsetzbar. Allerdings kann eine Anpassung geltender Gesetze aufgrund der besseren Leistungsfähigkeit von Assistenzsystemen im Vergleich zum menschlichen Fahrer, wie zum Beispiel die Reduzierung des vorgeschriebenen Abstandes zum vorausfahrenden Fahrzeug, eine Steigerung der Verkehrskapazität ermöglichen.

5.4 Abschätzung der Auswirkungen auf den Verkehr

Neben der Effizienzbewertung des individuellen Fahrverhaltens ermöglicht die Kenngröße der räumlich-zeitlichen Straßenbelegung auch die Abschätzung der voraussichtlichen Auswirkung des Verkehrsassistenzsystems auf den Verkehr noch vor der eigentlichen Simulationsuntersu-

chung. Dafür werden im Rahmen dieser Arbeit die in Tabelle 5-2 zusammengefassten makroskopischen Verkehrskenngrößen verwendet.

Ausprägung	Verkehrskenngröße
räumlich-zeitlich	räumlich-zeitlicher Fahrzeugdurchsatz [$Fzg/(km \cdot h)$]
lokal	Verkehrsfluss [Fzg/h]
momentan	Verkehrsdichte [Fzg/km]

Tabelle 5-2: Verwendete Verkehrskenngrößen zur Abschätzung der Auswirkungen auf den Verkehr

Mögliche Wechselwirkungen zwischen Fahrer-Fahrzeug-Einheiten werden im Rahmen dieser Abschätzung nicht berücksichtigt. Dadurch gelten die Randbedingungen der Zustandsgleichung des Verkehrs, d. h. es liegt stationärer und homogener Verkehrsfluss vor. In den folgenden Betrachtungen wird zur Vereinfachung der Notation die Abhängigkeit der Größen von \bar{v} nicht explizit formuliert.

Für die Bestimmung des räumlich-zeitlichen Durchsatzes von Fahrer-Fahrzeug-Einheiten auf dem betrachteten Streckenabschnitt ist zunächst die gesamte zur Verfügung stehende räumlich-zeitliche Straßenfläche F_{gesamt} zu berechnen. Diese wird definiert als:

$$F_{gesamt} := l_{Strecke} \cdot b_{Strecke} \cdot t_{Zeitdauer} \quad \text{Gleichung 5-35}$$

$l_{Strecke}$	Länge des betrachteten Streckenabschnitts
$b_{Strecke}$	Fahrstreifenbreite auf dem betrachteten Streckenabschnitt
$t_{Zeitdauer}$	Zeitdauer der Betrachtung

Damit ergibt sich der räumlich-zeitliche Fahrzeugdurchsatz bei optimiertem Fahrverhalten aller Fahrer-Fahrzeug-Einheiten aus

$$n_{max,opt} := \frac{F_{gesamt}}{F_{b,opt}} \quad \text{Gleichung 5-36}$$

und entsprechend

$$n_{max,SQ} := \frac{F_{gesamt}}{F_{b,SQ}} \quad \text{Gleichung 5-37}$$

für das Status Quo Fahrverhalten. Die prozentuale Steigerung des räumlich-zeitlichen Durchsatzes von Fahrer-Fahrzeug-Einheiten ergibt sich aus

$$N_{max,opt} := \frac{n_{max,opt}}{n_{max,SQ}} \quad \text{Gleichung 5-38}$$

Diese Abschätzung setzt voraus, dass alle Fahrer-Fahrzeug-Einheiten das identische Fahrverhalten besitzen. Für die Bestimmung des räumlich-zeitlichen Fahrzeugdurchsatzes bei Mischverkehr, bestehend aus optimalem und Status Quo Fahrverhalten, wird die prozentuale Verkehrszusammensetzung verwendet. Die in diesem Fall räumlich-zeitlich belegte Straßenfläche wird als

$$F_{b,gemischt} := (X_{opt} \cdot F_{b,opt}) + (X_{SQ} \cdot F_{b,SQ}) \quad \text{Gleichung 5-39}$$

X_{opt}	prozentualer Anteil von optimiertem Fahrverhalten
X_{SQ}	prozentualer Anteil von Status Quo Fahrverhalten

definiert, dabei gilt immer:

$$X_{opt} + X_{SQ} = 1. \quad \text{Gleichung 5-40}$$

Somit ergibt sich der räumlich-zeitliche Fahrzeugdurchsatz bei Mischverkehr aus:

$$n_{max,gemischt} := \frac{F_{gesamt}}{F_{b,gemischt}}. \quad \text{Gleichung 5-41}$$

Die entsprechende prozentuale Steigerung gegenüber dem Status Quo ergibt sich aus

$$N_{max,gemischt} := \frac{n_{max,gemischt}}{n_{max,SQ}}. \quad \text{Gleichung 5-42}$$

Abbildung 5-7 zeigt das Vorgehen für die Abschätzung der Auswirkungen des Verkehrsassistenzsystems auf den räumlich-zeitlichen Fahrzeugdurchsatz.

Für die Abschätzung der Auswirkungen auf den lokalen Verkehrsfluss q und die momentane Verkehrsdichte ρ ist die räumlich-zeitliche Straßenbelegung unter Verwendung der Länge des betrachteten Streckenabschnitts

$$l_{Strecke} = s_2 - s_1 \quad \text{Gleichung 5-43}$$

und der Durchfahrtsdauer einer Fahrer-Fahrzeug-Einheit

$$t_{Durchfahrt} = t(s_2) - t(s_1) \quad \text{Gleichung 5-44}$$

durch Mittelwertbildung in eine mittlere lokale räumlich-zeitliche Straßenbelegung

$$F_{b,lok} := \frac{F_b}{l_{Strecke}} \quad \text{Gleichung 5-45}$$

und eine mittlere momentane räumlich-zeitliche Straßenbelegung

$$F_{b,mom} := \frac{F_b}{t_{Durchfahrt}} \quad \text{Gleichung 5-46}$$

zu transformieren. Dabei beschreibt $F_{b,lok}$ den durchschnittlichen Zeitbedarf einer Fahrer-Fahrzeug-Einheit, um eine lokale Messstelle in dem Streckenintervall zu passieren. $F_{b,mom}$ entspricht dem durchschnittlich belegten Straßenabschnitt während einer momentanen Messung in dem Streckenintervall.

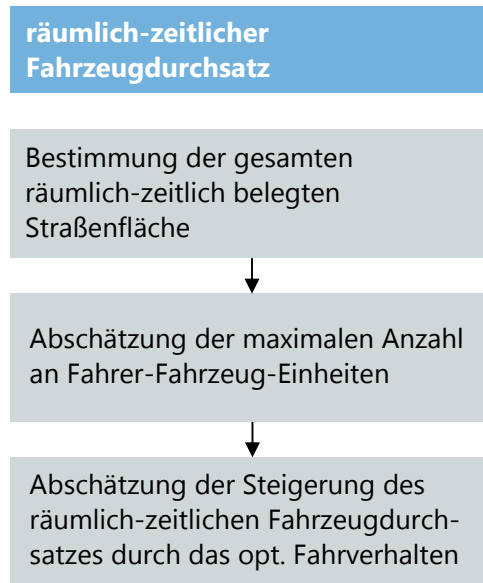


Abbildung 5-7: Abschätzung der Auswirkungen eines Verkehrsassistenzsystems auf den räumlich-zeitlichen Fahrzeugdurchsatz

Sowohl der Verkehrsfluss als auch die -dichte sind fahrstreifenbezogene makroskopische Kenngrößen. Da nicht zwei Fahrer-Fahrzeug-Einheiten auf einem Fahrstreifen nebeneinander fahren können, ist für die folgende Abschätzung der Auswirkungen auf den Verkehrsfluss und die Verkehrsdichte nur die räumlich-zeitliche Straßenbelegung in Fahrzeug-Längsrichtung $F_{b,längs}$ relevant:

$$F_{b,längs} := (s_{0,längs} + l_{Fzg}) \cdot \left(\frac{s_2 - s_1}{\bar{v}} \right) + (t_{Zeitlücke} \cdot (s_2 - s_1)). \quad \text{Gleichung 5-47}$$

Die belegte räumlich-zeitliche Straßenfläche des optimierten Fahrverhaltens in Längsrichtung kann durch

$$F_{b,opt,längs} := \frac{F_{b,opt}}{s_{quer,ges} + b_{Fzg}} \quad \text{Gleichung 5-48}$$

beziehungsweise

$$F_{b,SQ,l\ddot{a}ngs} := \frac{F_{b,SQ}}{s_{quer,ges} + b_{Fzg}} \quad \text{Gleichung 5-49}$$

berechnet werden. Damit ergeben sich die mittleren lokalen Größen aus

$$F_{b,opt,lok} := \frac{F_{b,opt,l\ddot{a}ngs}}{l_{Strecke}}, \quad F_{b,SQ,lok} := \frac{F_{b,SQ,l\ddot{a}ngs}}{l_{Strecke}}, \quad \text{Gleichung 5-50}$$

und die mittleren momentanen Größen entsprechend

$$F_{b,opt,mom} := \frac{F_{b,opt,l\ddot{a}ngs}}{t_{Durchfahrt}}, \quad F_{b,SQ,mom} := \frac{F_{b,SQ,l\ddot{a}ngs}}{t_{Durchfahrt}}. \quad \text{Gleichung 5-51}$$

Auf Basis der mittleren lokalen-zeitlichen und mittleren momentanen-räumlichen Straßenbelegung werden der mittlere Verkehrsfluss q_m pro Stunde

$$q_{m,opt} := \frac{3600 \text{ s/h}}{F_{b,opt,lok}}, \quad q_{m,SQ} := \frac{3600 \text{ s/h}}{F_{b,SQ,lok}} \quad \text{Gleichung 5-52}$$

und die mittlere Verkehrsdichte ρ_m pro Kilometer bestimmt

$$\rho_{m,opt} := \frac{1000 \text{ m/km}}{F_{b,opt,mom}}, \quad \rho_{m,SQ} := \frac{1000 \text{ m/km}}{F_{b,SQ,mom}}. \quad \text{Gleichung 5-53}$$

Die Steigerung des mittleren Verkehrsflusses Q_m und der mittleren Verkehrsdichte P_m ergeben sich aus

$$Q_m := \frac{q_{m,opt}}{q_{m,SQ}} \quad \text{Gleichung 5-54}$$

und

$$P_m := \frac{\rho_{m,opt}}{\rho_{m,SQ}}. \quad \text{Gleichung 5-55}$$

Abbildung 5-8 fasst die Abschätzung der Auswirkungen des optimierten Fahrverhaltens auf den mittleren Verkehrsfluss und die mittlere Verkehrsdichte zusammen. Für die Betrachtung des theoretischen Mischverkehrs ist analog zur Bestimmung des räumlich-zeitlichen Fahrzeugdurchsatzes $F_{b,gemischt}$ statt F_b zu verwenden.

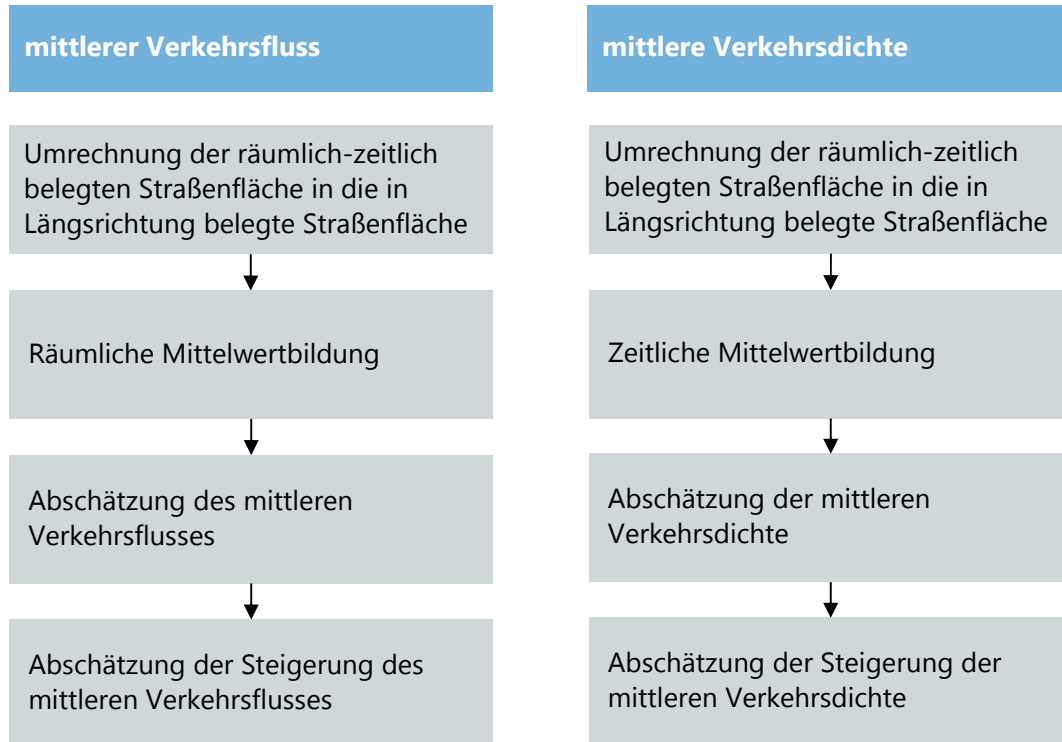


Abbildung 5-8: Methodische Abschätzung der Auswirkungen auf den mittleren Verkehrsfluss und die mittlere Verkehrsdichte

5.5 Einsatzmöglichkeiten von Verkehrsassistenzsystemen

Basierend auf der Effizienzuntersuchung des Status Quo Fahrverhaltens lassen sich Einsatzgebiete für Verkehrsassistenzsysteme identifizieren. Für die folgende Analyse anhand des Fundamentaldiagramms werden der stabile und der instabile Bereich sowie deren Übergang betrachtet. Diese sind schematisch in Abbildung 5-9 eingezeichnet. Für die Bestimmung der Einsatzmöglichkeiten wird davon ausgegangen, dass das verkehrsoptimale Fahrverhalten und damit $F_{b,opt}$ für die betrachteten Situationen bekannt ist.

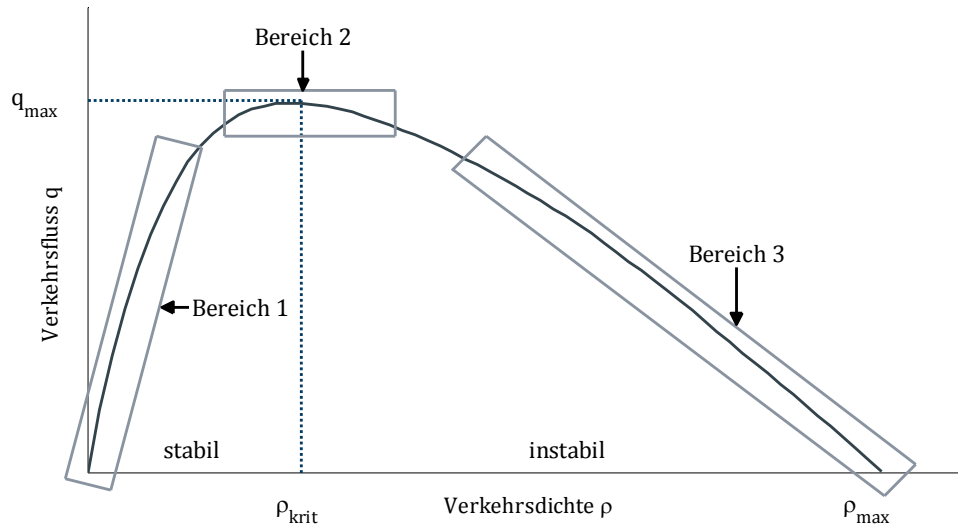


Abbildung 5-9: Bereiche des Fundamentaldiagramms zur Identifikation von Einsatzgebieten von Verkehrssystemen

Liegt der aktuelle Verkehrsfluss q unter dem maximalen Fluss bei der erlaubten Höchstgeschwindigkeit q_{max} und ist die Verkehrsdichte ρ kleiner als die kritische Dichte ρ_{krit} , liegt eine geringe Verkehrsnachfrage vor. Daher ist keine verkehrliche Optimierung des Fahrverhaltens notwendig, unabhängig von der räumlich-zeitlich belegten Straßenfläche. Die Fahrer können ohne negative verkehrliche Auswirkungen ihr Fahrverhalten individuell, zum Beispiel hinsichtlich der Kraftstoffeffizienz, optimieren. In dem Fundamentaldiagramm aus Abbildung 5-9 entspricht dies Bereich eins und damit dem stabilen Verkehr. Zusammenfassend gilt:

$$(q < q_{max}) \wedge (\rho < \rho_{krit}).$$

Bereich 1 \rightarrow *verkehrliche Optimierung des individuellen Fahrverhaltens nicht notwendig* Gleichung 5-56

Wenn der aktuelle Verkehrsfluss in der Nähe des maximalen Flusses bei der erlaubten Höchstgeschwindigkeit liegt und die kritische Dichte erreicht ist, entspricht dies dem Übergang vom stabilen in den instabilen Verkehrsbereich und damit dem zweiten Bereich. In diesem Fall ist die räumlich-zeitliche Straßenbelegung $F_{b,SQ}$ zu bestimmen. Entspricht diese bereits der optimalen Straßenbelegung $F_{b,opt}$, kann das individuelle Fahrverhalten nicht weiter verkehrlich optimiert werden. In dieser Situation ist eine Steigerung des Verkehrsflusses nur durch den Bau zusätzlicher Fahrstreifen oder einer Anpassung der gesetzlichen Randbedingungen wie z. B. der erlaubten Höchstgeschwindigkeit möglich:

$$(q \approx q_{max}) \wedge (\rho \approx \rho_{krit}) \wedge (F_{b,SQ} \approx F_{b,opt}).$$

Bereich 2 \rightarrow *Straßenbau bzw. Anpassung der gesetzlichen Randbedingungen notwendig* Gleichung 5-57

Wenn in diesem Bereich jedoch die räumlich-zeitliche Straßenbelegung $F_{b,SQ}$ deutlich größer als $F_{b,opt}$ ist, existiert eine Einsatzmöglichkeit für Verkehrsassistenzsysteme:

$$(q \approx q_{max}) \wedge (\rho \approx \rho_{krit}) \wedge (F_{b,SQ} > F_{b,opt}).$$

Bereich 2

→ Einsatzmöglichkeit für

Verkehrsassistenzsysteme

Gleichung 5-58

Basierend auf den Betrachtungen in den Kapiteln 3 und 4 ist insbesondere im Bereich 2 der Einsatz von Verkehrsassistenzsystemen sinnvoll, da durch die Vermeidung der menschlichen Fahrfehler die maximale Geschwindigkeit gesteigert bzw. der notwendige Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug reduziert werden kann.

Befindet sich der Verkehr im instabilen und damit im dritten Bereich von Abbildung 5-9, ist analog zu obigem Einsatzgebiet die räumlich-zeitlich belegte Straßenfläche des Status Quo mit dem optimierten Fahrverhalten zu vergleichen:

$$(q < q_{max}) \wedge (\rho > \rho_{krit}) \wedge (F_{b,SQ} > F_{b,opt}).$$

Bereich 3

→ Einsatzmöglichkeit für

Verkehrsassistenzsysteme

Gleichung 5-59

Solche Einsatzbereiche mit einem hohen Verkehrsaufkommen und kurzfristig reduzierter Kapazität können zum Beispiel Baustellen mit einer Fahrstreifenreduktion auf Autobahnen oder lichtsignalanlagengeregelte Knotenpunkte in Innenstädten sein.

5.6 Diskussion

Zu Beginn dieses Kapitels wurde ein neues Gütekriterium für die Optimierung des Verkehrs hergeleitet. Mit diesem kann das individuelle Fahrverhalten hinsichtlich der Verkehrseffizienz optimiert werden. Existierende Gütekriterien, wie beispielsweise Reisezeit und Verbrauch, sind zur Bestimmung der verkehrlichen Effizienz von individuellem Fahrverhalten nicht ausreichend, da sie die zur Verfügung stehende Straßenfläche als begrenzendes Maß für den Verkehrsfluss nicht berücksichtigen. Durch die Beachtung der Straßenfläche lassen sich die Auswirkungen des individuell veränderten Fahrverhaltens auf den gesamten Verkehr sowie auf existierende Verkehrskenngrößen bestimmen. Weiterhin ermöglicht die Kenngröße der räumlich-zeitlichen Straßenbelegung auch die Identifikation von Verkehrssituationen, in denen die Optimierung des Verkehrs durch individuell verändertes Fahrverhalten sinnvoll ist. Diese Eigenschaften besitzen die bisher verwendeten Kenngrößen beziehungsweise Gütekriterien ebenfalls nicht.

Die Einheit der hergeleiteten räumlich-zeitlichen Straßenbelegung [m^2s] kann anhand eines einfachen Beispiels plausibilisiert werden: Eine Verdoppelung der Straßenfläche ermöglicht theoretisch einen doppelten Fahrzeugdurchsatz, genau wie ein doppelter Betrachtungszeit-

raum. Eine zeitgleiche Verdoppelung sowohl der Straßenfläche als auch des Zeitraumes ermöglicht auch in dem hergeleiteten Modell eine Vervierfachung des Fahrzeugdurchsatzes.

Basierend auf dem Ziel der verkehrlichen Optimierung ist die räumlich-zeitlich belegte Straßenfläche zu minimieren. Für die Bestimmung des verkehrsoptimalen Fahrverhaltens wird im Rahmen dieser Arbeit eine einfache Parametervariation durchgeführt. Dieser Ansatz ist zeit-aufwendig, kann aber beispielsweise durch die Anwendung von Optimierungsalgorithmen effizienter gestaltet werden.

Gütekriterium	Individualbetrachtung	Kollektivbetrachtung
Reisezeit	$\int_{s_0}^{s_{Ziel}} dt \rightarrow \min$	Verkehrsverfügbarkeit
Komfort	$\int_{s_0}^{s_{Ziel}} a^2 dt \rightarrow \min$	Gleichmäßigkeit
Verbrauch / Emission	$\int_{s_0}^{s_{Ziel}} P dt \rightarrow \min$	Kraftstoffverbrauch
verkehrliche Effizienz	$\int_{t(s_1)}^{t(s_2)} f_b(t, v(t)) dt \rightarrow \min$	Fahrzeugdurchsatz

Tabelle 5-3: Erweiterte Kriterien für die Steuerung des Straßenverkehrs

Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass idealisierter Verkehr ohne negative Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Fahrer-Fahrzeug-Einheiten und ohne die Durchführung einer Simulationsuntersuchung die Grundlage für die Abschätzung der verkehrlichen Auswirkungen von verändertem Fahrverhalten bildet. Aufgrund der in der Realität nicht ideal fahrenden Fahrer und der vorhandenen Wechselwirkungen zwischen Fahrer-Fahrzeug-Einheiten kann diese von den Betrachtungen und Herleitungen dieses Kapitels abweichen. Genau diese real vorhandenen Unzulänglichkeiten können aber durch Assistenzsysteme minimiert werden.

6 Simulationswerkzeug für Verkehrsassistenzsysteme

Für die Untersuchung der Auswirkungen von Verkehrsassistenzsystemen auf den Verkehr ist eine Simulation notwendig, die Gründe hierfür wurden in Abschnitt 4.1 beschrieben. Um die Auswirkungen systematisch zu analysieren, sind die in Kapitel 4.2 aufgestellten Regelkreise und somit die Kopplung von mikroskopischen Verkehrsfluss- und Verkehrsassistenzsystemmodellen in einem Simulationswerkzeug abzubilden. Dies erlaubt die zielgerichtete Kombination von Verhaltensmodellen menschlicher Fahrer mit Verkehrsassistenzsystemmodellen unterschiedlicher Assistenzstrategien und Assistenzebenen.

Die aus der Modellkopplung resultierende Verknüpfung von Verkehrsdynamik und Verkehrsassistenz stellt vielfältige Forderungen an das Simulationswerkzeug. Fünf wesentliche Eigenschaften eines Simulationswerkzeugs sowie die zugehörigen Anforderungen für die Untersuchung von Verkehrsassistenzsystemen zeigt Tabelle 6-1.

Eigenschaften	Anforderungen
Betrachtungsgenauigkeit	detailliert bis Mittelwerte
Simulationsschrittweite	bis zu wenigen Millisekunden
Fahrzeugdynamik	vereinfacht
Straßennetz	große Netze, z. B. Städte, Autobahnen
Anzahl an Fahrzeugen	viele Fahrzeuge

Tabelle 6-1: Wesentliche Eigenschaften eines Simulationswerkzeugs sowie zugehörige Anforderungen für die Untersuchung von Verkehrsassistenzsystemen

Dabei beschreibt die Betrachtungsgenauigkeit, wie detailliert die Simulation durchgeführt beziehungsweise deren Ergebnisse bestimmt werden müssen. Für Verkehrsassistenzsysteme ist dabei zwischen der Auslegung des Assistenzsystems und der Bestimmung der Auswirkungen auf die Verkehrskenngrößen zu unterscheiden. Für ersteres sind detaillierte Informationen wie zum Beispiel ein genauer Geschwindigkeitsverlauf notwendig, während hingegen letzteres mit gemittelten Ergebnissen möglich ist. Die Simulationsschrittweite für Assistenzsysteme liegt bei informierenden Systemen im Bereich weniger Sekunden, bei agierenden hingegen im Bereich bis zu wenigen Millisekunden. Eine vereinfachte Fahrzeugdynamik ist für die Abschätzung der Auswirkungen von Verkehrsassistenzsystemen auf den Verkehr ausreichend. Es ist beispielsweise nicht relevant, in welchem Gang eine Fahrer-Fahrzeug-Einheit fährt. Für Untersuchungen sind je nach Verkehrsassistenzsystem große Straßennetze, zum Beispiel Innenstädte oder auch Autobahnabschnitte zu modellieren. Zur Abbildung einer realistischen Verkehrsnachfrage müssen dementsprechend viele Fahrzeuge simuliert werden. Neben diesen beschriebenen existieren weitere Anforderungen an ein Simulationswerkzeug für Verkehrsassistenzsysteme, diese sind in Anhang A gelistet.

Den obigen Anforderungen stellt Tabelle 6-2 die Umsetzung in bisher verwendeten Werkzeugen für die mikroskopische Verkehrsflusssimulation und Fahrerassistenzsystemsimulation gegenüber.

Eigenschaften	mikroskopische Verkehrsflusssimulation	Fahrerassistenzsystemsimulation
Betrachtungsgenauigkeit	Mittelwerte	detailliert
Simulationsschrittweite	üblich 1 Sekunde	bis zu wenigen Millisekunden
Anzahl an Fahrzeugen	viele Fahrzeuge	wenige Fahrzeuge
Straßennetz	große Netze, z. B. Städte, Autobahnen	Straßenabschnitte, ggf. idealisiert
Fahrzeugdynamik	stark vereinfacht	detailliert

Tabelle 6-2: Umsetzung der Eigenschaften in Werkzeugen für die mikroskopische Verkehrsfluss- und Fahrerassistenzsystemsimulation

Die Übersicht verdeutlicht, dass die bisher verwendeten Werkzeuge aufgrund der unterschiedlichen Umsetzungen nicht für die Untersuchung von Verkehrsassistenzsystemen geeignet sind. Daher wird im Folgenden ein neues generisch anwendbares Simulationswerkzeug für die Auslegung, Untersuchung und Bewertung von Verkehrsassistenzsystemen entworfen. Dieses ermöglicht die Umsetzung der Kopplung von Verkehrsfluss- mit Verkehrsassistenzsystemen entsprechend Kapitel 4 und die Auslegung und Bewertung von Assistenzsystemen nach Kapitel 5.

Im Folgenden wird zunächst der Aufbau des neuen Werkzeugs dargestellt. Anschließend wird die Modellierung von Fahrer-Fahrzeug-Einheiten beschrieben sowie die Möglichkeiten der Simulation infrastrukturseitiger Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen aufgezeigt.

6.1 Aufbau des Simulationswerkzeugs

Um die oben und in Anhang A genannten Forderungen an eine Simulation von Verkehrsassistenzsystemen zu erfüllen, wird im Folgenden ein nach [GKL06] als Co-Simulation bezeichnetes Werkzeug aus Bestandteilen der mikroskopischen Verkehrsfluss- und der Assistenzsystemsimulation entworfen. Dadurch werden die für die Untersuchung von Verkehrsassistenzsystemen benötigten Funktionen einer Verkehrsflusssimulation mit der notwendigen freien Programmierbarkeit von Assistenzsystemen verknüpft. Aufgrund des Aufbaus mit generischen Werkzeugen erlaubt die Co-Simulation sowohl eine für alle Verkehrsassistenzsysteme gleiche Modellierung sowie die Anwendung in beliebigen Verkehrsszenarien. Im Folgenden wird zunächst die Struktur der Co-Simulation beschrieben und anschließend der Ablauf einer Simulationsuntersuchung vorgestellt.

6.1.1 Struktur der Co-Simulation

Basierend auf Tabelle 2-1 wird im Rahmen dieser Arbeit die mikroskopische Verkehrsflusssimulation durch das Werkzeug SUMO (Simulation of Urban Mobility) [SUM15] (vergleiche auch Kapitel 2.3.2) in der Version 0.12.3 ausgeführt. Der nicht-kommerzielle open-source Ansatz von SUMO (lizensiert unter General Public License) ermöglicht die kostenlose Nutzung des Werkzeugs sowie dessen freie Erweiterung um beispielsweise neue mikroskopische Verhaltensmodelle. Matlab als Programm für numerische Berechnungen [MAT15] wird, zusammen mit dessen Toolbox Simulink als Werkzeug für Model Based Design [SIM15], aufgrund seiner Verbreitung und Anwendbarkeit als Simulationswerkzeug für Verkehrsassistenzsysteme in der Version 2011a verwendet. Dabei werden die Assistenzsysteme in einem Simulink-Modell abgebildet. Die Co-Simulation aus Sumo und Matlab / Simulink gewährleistet durch die Erfüllung der Anforderungen eine optimale Umsetzung des Werkzeugs in der Praxis, vgl. Tabelle 6-3.

Werkzeug	mikroskopischer Modellansatz	Simulation großer Szenarien	Modellierung von VAS	open-source Ansatz
Co-Simulation	+	+	+	+

Tabelle 6-3: Eigenschaften der Co-Simulation

Für die Anbindung einer externen Anwendung besitzt SUMO das Traffic-Control-Interface (TraCI). Über dieses Interface wird Matlab / Simulink gekoppelt und greift hierdurch online auf eine laufende Verkehrsflusssimulation zu. Diesen grundsätzlichen Aufbau des Simulationswerkzeugs zeigt Abbildung 6-1.



Abbildung 6-1: Grundsätzlicher Aufbau des Co-Simulationswerkzeugs

Für die Verbindung beider Simulationswerkzeuge verwendet das Traffic-Control-Interface eine Transmission Control Protocol / Internet Protocol (TCP / IP)-basierte Server-Client-Architektur. Hierzu beinhaltet SUMO die C++-Klasse „Socket“. Diese stellt die notwendigen Methoden für die TCP / IP-Verbindung bereit, die wichtigsten Funktionen sind in Tabelle 6-4 zusammengefasst.

C++ Funktionen	Aufgabe
Socket	Starten eines Sockets an einem definierten Port
Connect	Herstellen einer Verbindung mit einem Client an einem definierten Port
has_client_connection	Abfragen, ob eine erfolgreiche Verbindung existiert
sendExact	Senden einer Nachricht als Storage-Objekt an SUMO
receiveExact	Empfangen einer Nachricht als Storage-Objekt von SUMO
Close	Schließen der Verbindung

Tabelle 6-4: C++ Funktionen der Klasse „Socket“

Unter Verwendung der C++-Klasse „Socket“ ist der TCP / IP-Client in Matlab / Simulink zu programmieren. Aufgrund der Implementierung der Verkehrsassistenzsystemmodelle in einem Simulink-Modell wird im Rahmen dieser Arbeit eine C++-S-Function programmiert. Matlab / Simulink steuert dabei als Client den Simulationsablauf. Für Informationen über S-Functions wird auf [MAT12] und [ABR11], für die Anwendung und Syntax von C++ auf [STR11], [BRA10], [NAH09] und [KS05] und für weitere Erläuterungen über den Aufbau von TCP / IP-Verbindungen auf [COM11], [MBW10] und [KAI09] verwiesen.

Für die Beeinflussung einer laufenden Simulation beinhaltet SUMO die C++ Klasse „Storage“. Diese enthält SUMO-Datentypen für die Nachrichtenerstellung, der Header „TraCIConstants.h“ beschreibt die Traffic-Control-Interface-Kommandos. Diese sind in drei Bereiche eingeteilt, welche wiederum in mehrere Gruppen unterschieden werden, vgl. Tabelle 6-5.

Klasse	Gruppe
general command	control related, environment related
value retrieval	induction loop, detector, traffic light, lane, vehicle, vehicle type, route, point of interest, polygon, junction, edge, simulation, gui
state changing	lane, traffic light, vehicle, point of interest, polygon, edge, gui

Tabelle 6-5: Klassen- und Gruppeneinteilung der Traffic-Control-Interface Kommandos

Grundsätzlich wird zwischen allgemeinen Kommandos „general commands“, der Informationsabfrage „value retrieval“ und der Simulationsbeeinflussung „state changing“ unterschieden. Das Traffic-Control-Interface ermöglicht dadurch sowohl die Informationsabfrage aus einer laufenden Simulation als auch das Überschreiben von Simulationswerten. Durch den open-source-Ansatz und den somit frei verfügbaren Quellcode ist es möglich, das TraCI bei Bedarf um weitere Kommandos zu erweitern.

6.1.2 Ablauf einer Simulationsuntersuchung

Vor einer Simulationsuntersuchung wartet SUMO unter Angabe eines Remote-Ports auf die eingehende Verbindung von Matlab / Simulink. Die S-Function verbindet sich während des Simulationsstarts des Simulink-Modells mit SUMO und stellt damit die TCP / IP-Verbindung her. Diesen Ablauf zeigt Abbildung 6-2 in einem Sequenzdiagramm.

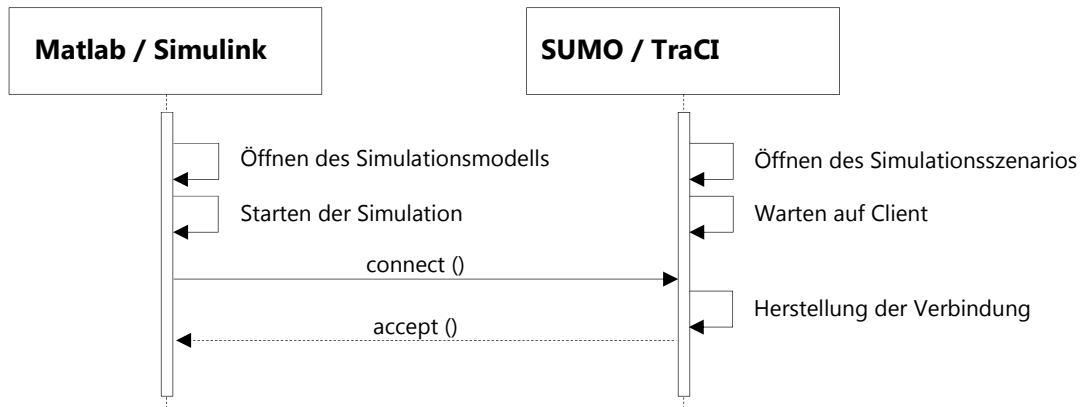


Abbildung 6-2: Sequenzdiagramm zum Herstellen der TCP / IP-Verbindung zwischen SUMO und Matlab / Simulink

Während einer Simulation steuert die S-Function deren Ablauf anhand der implementierten TraCI-Kommandos. Die Abfrage von Werten aus der Verkehrsflusssimulation und die Simulationsbeeinflussung werden jeweils unter der Angabe einer Fahrzeug-Identifikationsnummer (ID) durchgeführt. Weiterhin ist der nächste Simulationsschritt immer durch den Client auszulösen. Durch diese Vorgehensweise wird sichergestellt, dass die Simulationen sowohl in SUMO als auch in Matlab / Simulink zeitsynchron ablaufen. Die Untersuchungen müssen dadurch nicht in einer bestimmten Taktzeit oder Echtzeit durchgeführt werden. Das entsprechende Sequenzdiagramm zeigt Abbildung 6-3 mit den Beispielen Geschwindigkeit und Position einer Fahrer-Fahrzeug-Einheit.

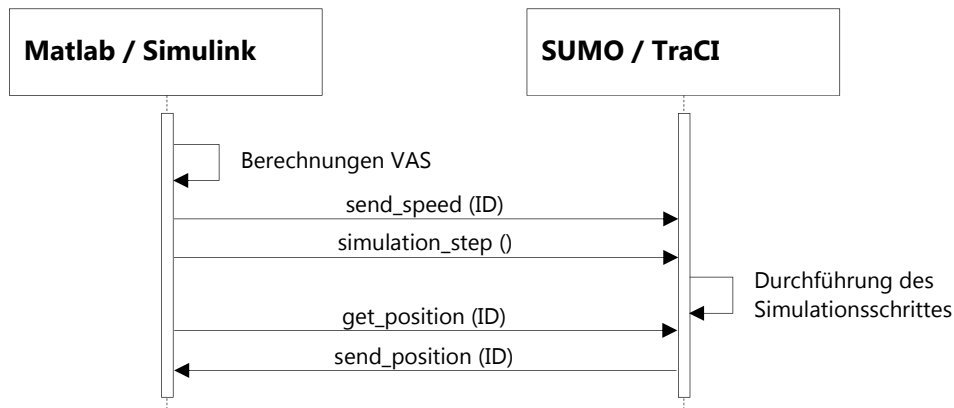


Abbildung 6-3: Sequenzdiagramm zum Ablauf der Simulation

Die Dauer einer Simulation wird in dem Simulink-Modell festgelegt. Um den Simulationslauf zu beenden, wird die TCP / IP-Verbindung mit dem entsprechenden TraCI-Kommando durch die S-Function geschlossen, vergleiche Abbildung 6-4. Tabelle 6-6 zeigt die Struktur der in Simulink implementierten S-Function.

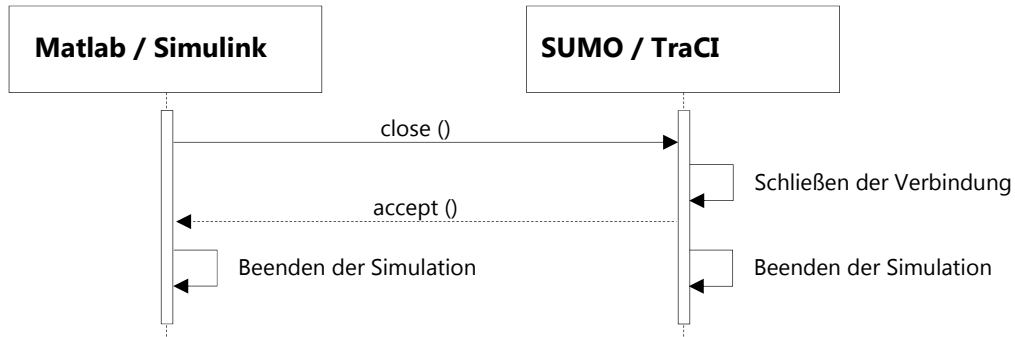


Abbildung 6-4: Sequenzdiagramm zum Beenden der Verbindung

Abschnitt der S-Function	Funktion
<code>mdlStart</code>	Herstellen der Verbindung zu SUMO
<code>mdlOutputs</code>	Steuerung des Simulationsablaufs und Berechnung der Outputs der S-Function in dem Simulink-Modell
<code>mdlTerminate</code>	Schließen der Verbindung zu SUMO

Tabelle 6-6: Aufbau und Funktionen der S-Function

Im Anschluss an die Simulation sind die Auswirkungen des Verkehrsassistenzsystems auf die Verkehrskenngrößen anhand der in Matlab / Simulink gespeicherten Daten auszuwerten. Die ermittelten Daten können für die Auslegung, Optimierung und Bewertung der verkehrlichen Effizienz eines Verkehrsassistenzsystems entsprechend Kapitel 5 verwendet werden. Weiterhin kann hierfür auch die SUMO-interne Auswertung verwendet werden. Der prinzipielle Ablauf einer Simulationsuntersuchung ist in Abbildung 6-5 zusammengefasst.

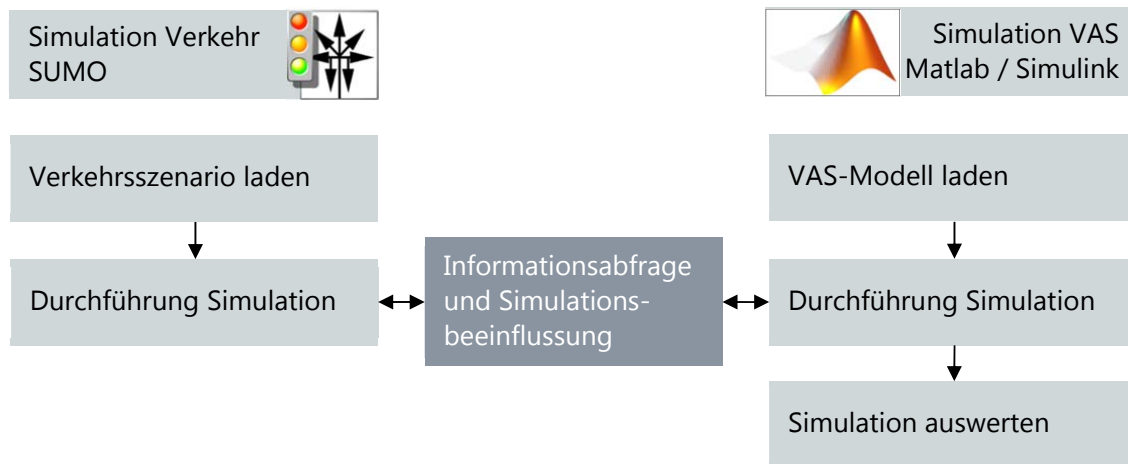


Abbildung 6-5: Prinzipieller Ablauf einer Simulationsuntersuchung

6.2 Modellierung von Fahrer-Fahrzeug-Einheiten

Für die Untersuchung von Verkehrsassistenzsystemen sind sowohl Fahrer-Fahrzeug-Einheiten mit als auch ohne Assistenzsystem zu modellieren. Die in Kapitel 4 erarbeitete Kopplung von Verkehrsfluss- und Assistenzsystemmodellen basiert auf der Erweiterung des mikroskopischen Verhaltensmodells einer Fahrer-Fahrzeug-Einheit und wird in Matlab / Simulink umgesetzt. Die dafür notwendigen Eingangs- beziehungsweise Führungsgrößen sind genau wie die Ausgangs- und Regelgrößen mit Hilfe des TraCI zwischen SUMO und Matlab / Simulink zu übertragen.

6.2.1 Abbildung des mikroskopischen Verhaltensmodells

Grundlage für die Untersuchung von Verkehrsassistenzsystemen sind Fahrer-Fahrzeug-Einheiten ohne Assistenzsysteme, welche den Status Quo Verkehr darstellen. Deren Modellierung erfolgt im Rahmen dieser Arbeit durch das bereits in SUMO implementierte mikroskopische Verhaltensmodell. Dadurch wird die Vergleichbarkeit zu anderen mit SUMO durchgeführten Simulationsuntersuchungen erhöht und somit die Übertragbarkeit der Ergebnisse vereinfacht.

Entsprechend der grundsätzlichen Struktur der Co-Simulation wird die Modellkopplung und damit das erweiterte Verhaltensmodell in Matlab / Simulink implementiert. Mit Hilfe des Traffic-Control-Interfaces ist es möglich, nur einzelne Fahraufgaben zu beeinflussen beziehungsweise nur einzelne Regelgrößen in SUMO zu überschreiben. Dies kann beispielsweise die Änderung der Geschwindigkeit oder die Durchführung eines Fahrstreifenwechsels sein. Daher ist es ausreichend, nur den vom Verkehrsassistenzsystem adressierten Teil des Verhaltensmodells in Matlab / Simulink zu modellieren. Die anderen, nicht durch das Assistenzsystem beeinflussten Fahraufgaben werden weiterhin durch das Verhaltensmodell in SUMO simuliert. Diese grundsätzliche Aufgabenteilung zwischen SUMO und Matlab / Simulink bezüglich der Modellierung einzelner Fahrer-Fahrzeug-Einheiten veranschaulicht Abbildung 6-6.

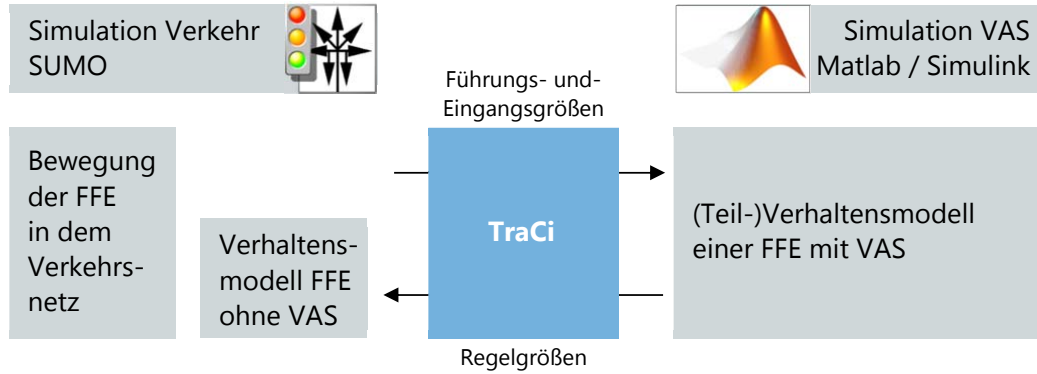


Abbildung 6-6: Aufgabenteilung zwischen SUMO und Matlab / Simulink

Um nicht für jede ausgestattete Fahrer-Fahrzeug-Einheit das Assistenzsystemmodell und das Verhaltensmodell in Matlab / Simulink implementieren zu müssen, wird eine arraybasierte Datenstruktur verwendet. Hierfür werden in einem eindimensionalen Array A_{ID} die Identifikationsnummern (ID) aller n Fahrer-Fahrzeug-Einheiten zusammengefasst, welche mit einem Verkehrsassistenzsystem ausgestattet sind:

$$A_{ID} := \begin{pmatrix} id_1 \\ \vdots \\ id_n \end{pmatrix}. \quad \text{Gleichung 6-1}$$

Nur für die im Array enthaltenen IDs werden die Eingangs- und Führungsgrößen per TraCI abgefragt, die Ausgangs- und Regelgrößen berechnet und an SUMO übermittelt. Dadurch lassen sich beliebige Ausstattungsrate modellieren.

Es werden alle Berechnungen des Simulink-Modells in dieser Struktur durchgeführt, so dass sich beispielsweise ein Geschwindigkeit-Array

$$V_{ID} := \begin{pmatrix} v_{id,1} \\ \vdots \\ v_{id,n} \end{pmatrix} \quad \text{Gleichung 6-2}$$

ergibt. Auf diese Art und Weise können auch die Befolgsrate

$$R_{B,ID} := \begin{pmatrix} R_{B,id,1} \\ \vdots \\ R_{B,id,n} \end{pmatrix} \quad \text{Gleichung 6-3}$$

und die Befolgungsgenauigkeit

$$G_{B,ID} := \begin{pmatrix} G_{B,id,1} \\ \vdots \\ G_{B,id,n} \end{pmatrix} \quad \text{Gleichung 6-4}$$

der Modellkopplung eines informierenden Verkehrsassistenzsystems oder verschiedene Parametersätze für die Kopplung mit einem agierenden Assistenzsystem abgebildet werden. Ein aus der Vorgehensweise abgeleitetes, schematisches Simulink-Modell zeigt Abbildung 6-7. Zwischen den einzelnen Blöcken werden nur die Arrays übermittelt.

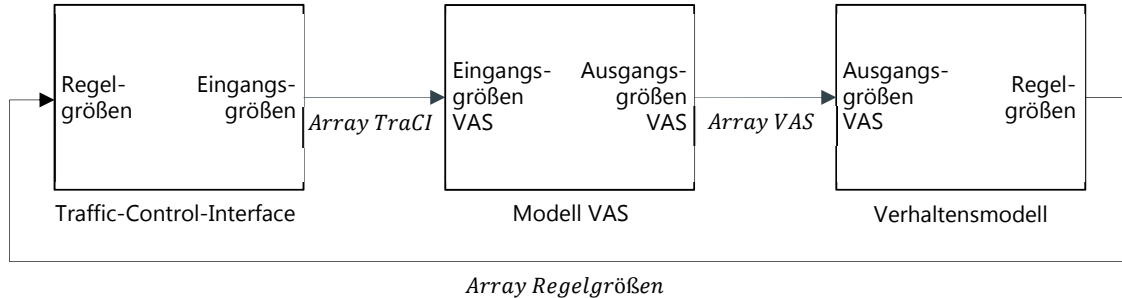


Abbildung 6-7: Prinzip der arraybasierten Datenstruktur

Für den Fall, dass in Matlab / Simulink verschiedene Assistenzsystemmodelle implementiert werden, sind hierfür analoge Ausstattungs-Arrays A_{ID} definiert.

6.2.2 Bestimmung der Eingangs- und Führungsgrößen

Ein mikroskopisches Verhaltensmodell benötigt Informationen über eine direkt vorausfahrende oder andere umgebende Fahrer-Fahrzeug-Einheiten als Eingangs- beziehungsweise Führungsgrößen. Diese werden von SUMO bisher nicht direkt über das TraCI bereitgestellt, daher werden sie im Rahmen der vorliegenden Arbeit in Matlab / Simulink berechnet.

Die Eingangsgrößen des Fahrzeugfolgmodells E_{FF} bezüglich der vorausfahrenden Fahrer-Fahrzeug-Einheit setzen sich aus dem Abstand s_{vFFE} sowie dessen Geschwindigkeit v_{vFFE} zusammen:

$$E_{FF} := \begin{pmatrix} s_{vFFE} \\ v_{vFFE} \end{pmatrix}. \quad \text{Gleichung 6-5}$$

Diese Größen werden in Abbildung 6-8 veranschaulicht. Dabei bezeichnet „ego“ die Fahrer-Fahrzeug-Einheit, für welche die Eingangsgrößen bestimmt werden.

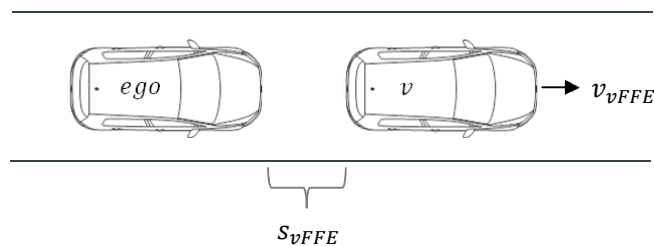


Abbildung 6-8: Eingangsgrößen eines Fahrzeugfolgmodells

Für die Bestimmung der vorausfahrenden Fahrer-Fahrzeug-Einheit wird zunächst mit dem TraCI-Kommando „*id list*“ eine Liste aller sich aktuell im Verkehrsszenario befindlichen Fahrer-Fahrzeug-Einheiten abgefragt. Die folgenden Befehle werden immer unter Angabe einer ID ausgeführt. Im zweiten Schritt wird mit den Kommandos „*lane id(ID)*“ und „*lane index(ID)*“ die befahrene Straße und der befahrene Fahrstreifen aller Fahrer-Fahrzeug-Einheiten ermittelt. Wenn sowohl die Lane-ID als auch der Lane-Index mit der eigenen Fahrer-Fahrzeug-Einheit übereinstimmen, ist mit dem Kommando „*lane position(ID)*“ deren Position auf der Straße abzufragen und darauf basierend der Abstand entsprechend

$$s_{vFFE} := lane_pos(ID) - lane_pos(ID_{ego}) \quad \text{Gleichung 6-6}$$

zu berechnen. Die vorausfahrende Fahrer-Fahrzeug-Einheit mit der Identifikationsnummer ID_v entspricht der ID mit dem geringsten Abstand:

$$ID_v := ID(\operatorname{argmin} s_{vFFE}) . \quad \text{Gleichung 6-7}$$

Anhand der bestimmten ID_v der vorausfahrenden Fahrer-Fahrzeug-Einheit lässt sich durch das TraCI-Kommando „*speed(ID_v)*“ unter anderem deren Geschwindigkeit abfragen.

Die für die Bestimmung verwendeten TraCI-Kommandos sind in Tabelle 6-7 zusammengefasst.

TraCI-Kommando	Funktion
id list Vehicle Value Retrieval	Abfragen der IDs aller FFE auf der Verkehrsweeinfrastuktur
lane id Vehicle Value Retrieval	Abfragen der aktuell befahrenen Straße einer FFE
lane index Vehicle Value Retrieval	Abfragen des aktuell befahrenen Fahrstreifens einer FFE
lane position Vehicle Value Retrieval	Abfragen der aktuellen Straßenposition einer FFE anhand einer ID
speed Vehicle Value Retrieval	Abfragen der aktuellen Geschwindigkeit einer FFE anhand einer ID

Tabelle 6-7: TraCI-Kommandos zur Bestimmung der Eingangsgrößen des mikroskopischen Verhaltensmodells einer Fahrer-Fahrzeug-Einheit (FFE)

Entsprechend der obigen Vorgehensweise erfolgt die Berechnung der Eingangsgrößen des Fahrstreifenwechselmodells E_{FSW} bezüglich umgebender Fahrer-Fahrzeug-Einheiten. Beispielfhaft werden zusätzliche Informationen über die hinterherfahrende (s_{hFFE}, v_{hFFE}) sowie die auf dem potenziellen Zielfahrstreifen beeinflusste Fahrer-Fahrzeug-Einheit (s_{hzFFE}, v_{hzFFE}) benötigt, vgl. Abbildung 6-9:

$$E_{FSW} = \begin{pmatrix} s_{vFFE} \\ v_{vFFE} \\ s_{hFFE} \\ v_{hFFE} \\ s_{zFFE} \\ v_{zFFE} \end{pmatrix}. \quad \text{Gleichung 6-8}$$

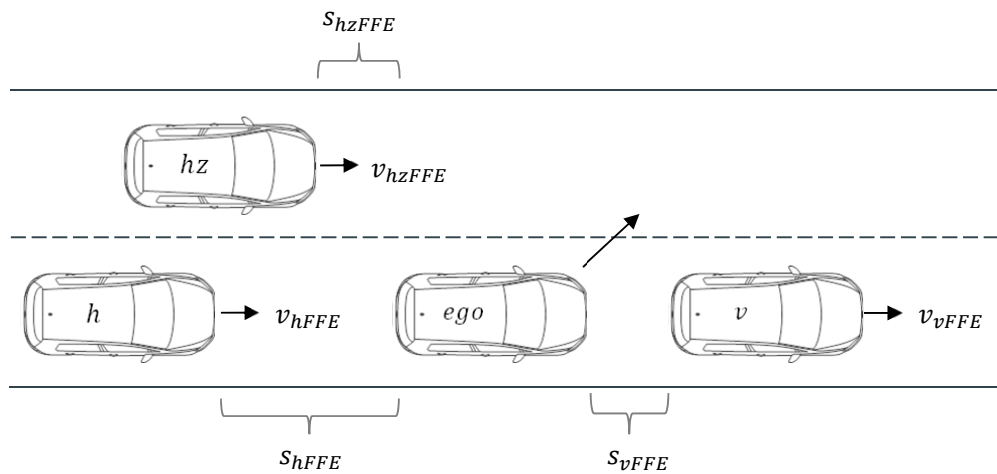


Abbildung 6-9: Eingangsgrößen des Fahrstreifenwechselmodells bezüglich umgebender Fahrer-Fahrzeug-Einheiten nach [TK10]

Die Bestimmung der Fahrer-Fahrzeug-Einheit ID_{hz} auf dem Nachbarfahrstreifen erfolgt unter Berücksichtigung des Fahrstreifen-Index. Die von SUMO hierfür vorgegebenen Indizes sind in Abbildung 6-10 dargestellt.

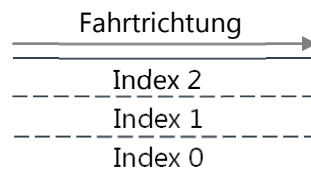


Abbildung 6-10: Fahrstreifenindizes in SUMO

Im Gegensatz zu den Eingangsgrößen des Fahrzeugfolge- und Fahrstreifenwechselmodells stellt das Traffic-Control-Interface für das Routenwahlmodell vielfältige Informationen über die laufende Simulation bereit. Insbesondere wird hierfür auf die Kommandos bezüglich Induktionsschleifen, Multi-Entry- / Multi-Exit-Detektoren, Lichtsignalanlagen, Straßen, Fahrzeugen und natürlich Routen verwiesen. Weitere Informationen zu den entsprechenden TraCI-

Kommandos sind in [SUM15] zu finden. Bei Bedarf können, beispielsweise analog zu der obigen Bestimmung der Eingangsgrößen, relevante Größen für das Routenwahlmodell mit eigenen Algorithmen in Matlab / Simulink berechnet werden.

6.2.3 Übermittlung der Ausgangs- und Regelgrößen

Die in Matlab / Simulink berechneten Ausgangs- und Regelgrößen einer Fahrer-Fahrzeug-Einheit sind per Traffic-Control-Interface an SUMO zu übergeben, die Kommandos hierfür sind in Tabelle 6-8 zusammengefasst. Die Übermittlung erfolgt immer unter Angabe der ID einer Fahrer-Fahrzeug-Einheit.

TraCI-Kommando	Funktion
speed, change vehicle state	Vorgeben der Geschwindigkeit einer FFE
change lane, change vehicle state	Erzwingen eines Fahrstreifenwechsels einer FFE
change route by id, change vehicle state	Vorgeben einer neuen, bereits definierten Route für eine FFE
change route, change vehicle state	Vorgeben einer neuen Route für eine FFE

Tabelle 6-8: TraCI-Kommandos zur Übermittlung der Regelgrößen

Mit dem Befehl „speed“ wird die in Matlab / Simulink berechnete Geschwindigkeit einer Fahrer-Fahrzeug-Einheit an SUMO übergeben und dort für den nächsten Simulationsschritt verwendet.

Das Kommando „change lane“ zwingt die Fahrer-Fahrzeug-Einheit zu einem Wechsel des Fahrstreifens. Dies erfolgt unter Angabe des Index des neu zu befahrenden Fahrstreifens, deren Benennung ist in Abbildung 6-10 dargestellt. Wenn die Position auf dem neuen Fahrstreifen durch eine andere Fahrer-Fahrzeug-Einheit belegt ist, wird durch SUMO kein Wechsel durchgeführt. In diesem Fall ist das Kommando bei Bedarf so lange zu senden, bis die Fahrer-Fahrzeug-Einheit einen Fahrstreifenwechsel durchgeführt hat.

Für den Routenwechsel gibt es mit den Kommandos „change route by id“ und „change route“ zwei Alternativen. Mit dem ersten Befehl wird für die adressierte Fahrer-Fahrzeug-Einheit eine neue, aber bereits in dem Routen-Config-File von SUMO definierte Route festgelegt. Mit dem zweiten Kommando wird eine neue Route, bestehend aus Lane-IDs definiert und an SUMO übergeben. Wenn aufgrund des Routenwechsels ein Fahrstreifenwechsel notwendig ist, wird dieser selbstständig von SUMO durchgeführt.

6.3 Simulation infrastrukturseitiger Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen

Für eine umfassende Bewertung der verkehrlichen Wirkungen von Verkehrsassistenzsystemen ist die vergleichende Simulation mit infrastrukturseitigen Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen sinnvoll. Dies ermöglicht die Ableitung von Lösungsempfehlungen für reale verkehrliche Problemstellungen.

Die Modellierung der infrastrukturseitigen Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen basiert auf der Unterscheidung, ob die Maßnahmen das Kollektiv oder individuelle Fahrer-Fahrzeug-Einheiten adressieren. Tabelle 6-9 ordnet die in Abschnitt 2.4 bereits vorgestellten Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen hinsichtlich der Adressaten.

Adressaten	Verkehrsbeeinflussungsmaßnahme
kollektiv	Lichtsignalanlagen, Streckenbeeinflussungsanlagen, Netzbeeinflussungsanlagen, Knotenbeeinflussungsanlagen, Zuflussregelanlage, temporäre Seitenstreifenfreigabe, Parkleitsysteme
individuell	Verkehrsfunk, Road-Pricing

Tabelle 6-9: Infrastrukturseitige Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen, klassifiziert nach Adressaten

Infrastrukturseitige Maßnahmen zur kollektiven Beeinflussung können auf zwei Arten modelliert werden: Als mikroskopische Verkehrsflusssimulation bietet SUMO bereits die Möglichkeit, diese infrastrukturseitigen Maßnahmen zu simulieren. Alternativ können entsprechende Steuerungsalgorithmen für beispielsweise Lichtsignal- oder Streckenbeeinflussungsanlagen in Matlab / Simulink implementiert und deren Berechnungsergebnisse während der laufenden Simulation mit Hilfe des Traffic-Control-Interfaces an SUMO übergeben werden.

Die individuell wirkenden Maßnahmen sind durch die Beeinflussung des in Matlab / Simulink abgebildeten Verhaltensmodells der Fahrer-Fahrzeug-Einheiten zu modellieren. Analog zu der Modellkopplung ist es möglich, auch bei der Untersuchung infrastrukturseitiger Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen eine Befolgungsrate und Befolgungsgenauigkeit abzubilden.

Neben der alleinigen Simulation von infrastrukturseitigen Maßnahmen oder Verkehrsassistenzsystemen ermöglicht die Kopplung von SUMO und Matlab / Simulink auch eine Simulation kooperativer Systeme. Hierbei wirken Maßnahmen der Infrastruktur zusammen mit den Assistenzsystemen und tauschen gegenseitig Informationen für eine optimierte Funktion und somit eine weitere Verkehrsflusssteigerung aus.

Ob die Lösung eines betrachteten Verkehrsproblems anhand von verkehrsoptimierenden Fahrerassistenzsystemen, infrastrukturseitigen oder kooperativen Maßnahmen am wirkungsvollsten ist, muss je nach konkreter Fragestellung anhand von Simulationsuntersuchungen bestimmt werden.

6.4 Diskussion

Das im Rahmen dieses Kapitels entworfene Simulationswerkzeug für Verkehrsassistenzsysteme wurde als generisch anwendbare Co-Simulation basierend auf verbreiteten und komfortabel anzuwendenden Simulationswerkzeugen entworfen. Das Simulationswerkzeug ermöglicht die Umsetzung der in Kapitel 4 entworfenen Modellkopplung sowie die Auslegung und Bewertung von Verkehrsassistenzsystemen entsprechend dem Vorgehen aus Kapitel 5. Neben der alleinigen Simulation von infrastrukturseitigen Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen oder Fahrerassistenzsystemen ermöglicht die Kopplung von SUMO und Matlab / Simulink die Simulation kooperativer Systeme. Die Co-Simulation ermöglicht sowohl eine systematische und damit für alle Verkehrsassistenzsysteme gleiche Modellierung sowie die Anwendung in beliebigen Verkehrsszenarien.

Eine mögliche zukünftige Aufgabe ist die Übermittlung der Eingangs- und Führungsgrößen per TraCI an Matlab / Simulink, diese sind SUMO-intern bereits vorhanden. Deren Bereitstellung per TraCI vereinfacht die zukünftige Nutzung des Simulationswerkzeugs.

Aufgrund der Nutzung von SUMO als mikroskopische Verkehrsflusssimulation ist dessen Funktionsumfang maßgeblich für die Nutzbarkeit des gekoppelten Simulationswerkzeugs.

7 Anwendungsbeispiele für Verkehrsassistenzsysteme

Die Untersuchung der in diesem Kapitel beschriebenen Anwendungsbeispiele basiert auf der Anwendung des Konzeptes zur Kopplung von Verkehrsfluss- mit Assistenzsystemmodellen, der Kenngröße der räumlich-zeitlichen Straßenbelegung sowie des Simulationswerkzeugs für Verkehrsassistenzsysteme. Die Beispiele zeigen die Praxistauglichkeit der bisherigen Arbeitsergebnisse und haben nicht das Ziel, Assistenzsysteme zu entwickeln.

Beispielhaft werden sowohl ein städtisches Szenario als auch eine Autobahnsituation betrachtet. Lichtsignalanlagen haben einen maßgeblichen Einfluss auf den innerstädtischen Verkehr, daher wird ein Ampelphasenassistenzsystem als erstes Anwendungsbeispiel untersucht. Da Verkehrsstaus auf Autobahnen die Mobilität nennenswert einschränken, wird als zweites Beispiel ein vorausschauendes Stauassistenzsystem betrachtet.

In beiden Anwendungsfällen werden zunächst die verkehrliche Problemstellung und das betrachtete Verkehrsszenario beschrieben. Daran schließt sich eine kurze Systemauslegung an, woraufhin das Vorgehen in der Simulationsbetrachtung erläutert und die verkehrlichen Auswirkungen bewertet werden. Für das Ampelphasenassistenzsystem wird zusätzlich eine Validierung der Fahrstrategien basierend auf realen Messfahrten durchgeführt. Damit wird die Übertragbarkeit der simulierten Ergebnisse auf die Realität untersucht.

7.1 Ampelphasenassistenzsystem

Ein Ampelphasenassistenzsystem berechnet bei der Annäherung an rote Lichtsignalanlagen die passende Geschwindigkeit, um einen Halt zu vermeiden. Dem Fahrer wird entweder die empfohlene Geschwindigkeit angezeigt oder diese durch das Verkehrsassistenzsystem aktiv geregelt. Dabei müssen vorausfahrende und bereits an der Haltelinie wartende Fahrzeuge in der Geschwindigkeitsberechnung berücksichtigt werden. Ein Ampelphasenassistenzsystem ist zum Erhalt der notwendigen Informationen über die Lichtsignalanlage auf einen Datenaustausch mit der Infrastruktur angewiesen.

Ampelassistenzsysteme wurden bereits vielfältig vorgestellt, z. B. in [AUD14], [OTT11], [BMW07], [MB06], [ZIM83] und auch in den Projekten „KOLINE“ (vgl. Abschnitt 1.2), „Travolution“ [TRA14] und „sim^{TD}“ [SIM13]. Eine Übersicht über weitere Projekte und Potenziale einer kooperativen Lichtsignalsteuerung zeigt [SKM14]. In vielen Beiträgen wird neben der Steigerung der Sicherheit durch die Vermeidung von Rotlichtverstößen explizit auch eine mögliche Verkehrsflusssteigerung adressiert. Neben fahrzeuggebundenen Systemen wurden z. B. in [GEO13] und [RH12] entsprechende Smartphone-Applikationen entwickelt. Weiterhin gibt es eine Vielzahl von Untersuchungen zur Optimierung der Schaltung von Lichtsignalanlagen sowie deren Koordination untereinander.

Um die verkehrliche Effizienz zu bewerten und das verkehrliche Potenzial eines Ampelphasenassistenzsystems zu ermitteln, wird im Folgenden ein agierendes System ohne die Überwachung durch den Fahrer untersucht.

7.1.1 Verkehrliche Problemstellung und betrachtetes Szenario

Lichtsignalanlagen sind räumlich-zeitliche Engstellen im Verkehr und können als temporäre Streckensperrungen aufgefasst werden. Für eine rote Lichtsignalanlage gilt für den Verkehrsfluss an der Haltelinie

$$q = 0 \frac{Fzg}{t_{rot}}, \quad \text{Gleichung 7-1}$$

die Engstelle im Verkehr ist somit eindeutig örtlich und zeitlich definiert. Weiterhin müssen die stehenden Fahrer-Fahrzeug-Einheiten nach dem Umschalten der Ampel auf Grün anfahren, wodurch sich der Verkehrsfluss erst langsam wieder aufbaut. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Fahrer-Fahrzeug-Einheiten nicht gleichzeitig anfahren, sondern aufgrund der Reaktionszeit erst nacheinander und mit unterschiedlichen zeitlichen Verzögerungen.

Das in Abbildung 7-1 dargestellte Raum-Zeit-Diagramm zeigt die simulierte Annäherung einer Fahrer-Fahrzeug-Einheit an eine Lichtsignalanlage aus einer Anfangsgeschwindigkeit von 50 km/h. Dabei entspricht jede Linie der Trajektorie einer Fahrer-Fahrzeug-Einheit in einem ansonsten leeren Verkehrsnetz, d. h. es gibt keinen Rückstau an einer roten Lichtsignalanlage. Die Steigung der einzelnen Trajektorien entspricht der gefahrenen Geschwindigkeit. Es zeigt sich logischerweise, dass die Fahrer-Fahrzeug-Einheiten an der roten Lichtsignalanlage anhalten. Diese schaltet zum Zeitpunkt $t = 10 \text{ s}$ von Grün auf Rot und zum Zeitpunkt $t = 40 \text{ s}$ wieder auf Grün.

Die Abbildung 7-2 zeigt exemplarisch vier Geschwindigkeitsverläufe aus dem obigen Raum-Zeit-Diagramm. In der ersten Fahrt muss die Fahrer-Fahrzeug-Einheit fast 20 s an der Haltelinie warten, erreicht diese im Raum-Zeit-Diagramm also zum Zeitpunkt $t = 20 \text{ s}$. In der vierten Fahrt hingegen muss die Fahrer-Fahrzeug-Einheit nur kurz halten, erreicht die Haltelinie also kurz vor dem Umschalten auf Grün. Die Zeitachse entspricht der aus Abbildung 7-1.

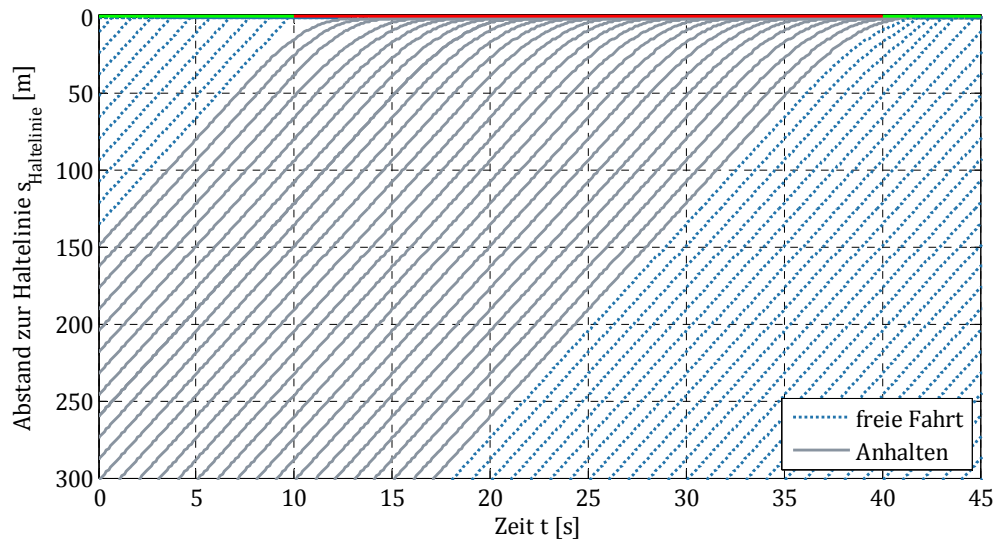


Abbildung 7-1: Annäherungen an eine Lichtsignalanlage im Raum-Zeit-Diagramm mit eingezeichneter Ampelphase, dabei entspricht die Fahrzeuggeschwindigkeit der Steigung einer jeweiligen Linie

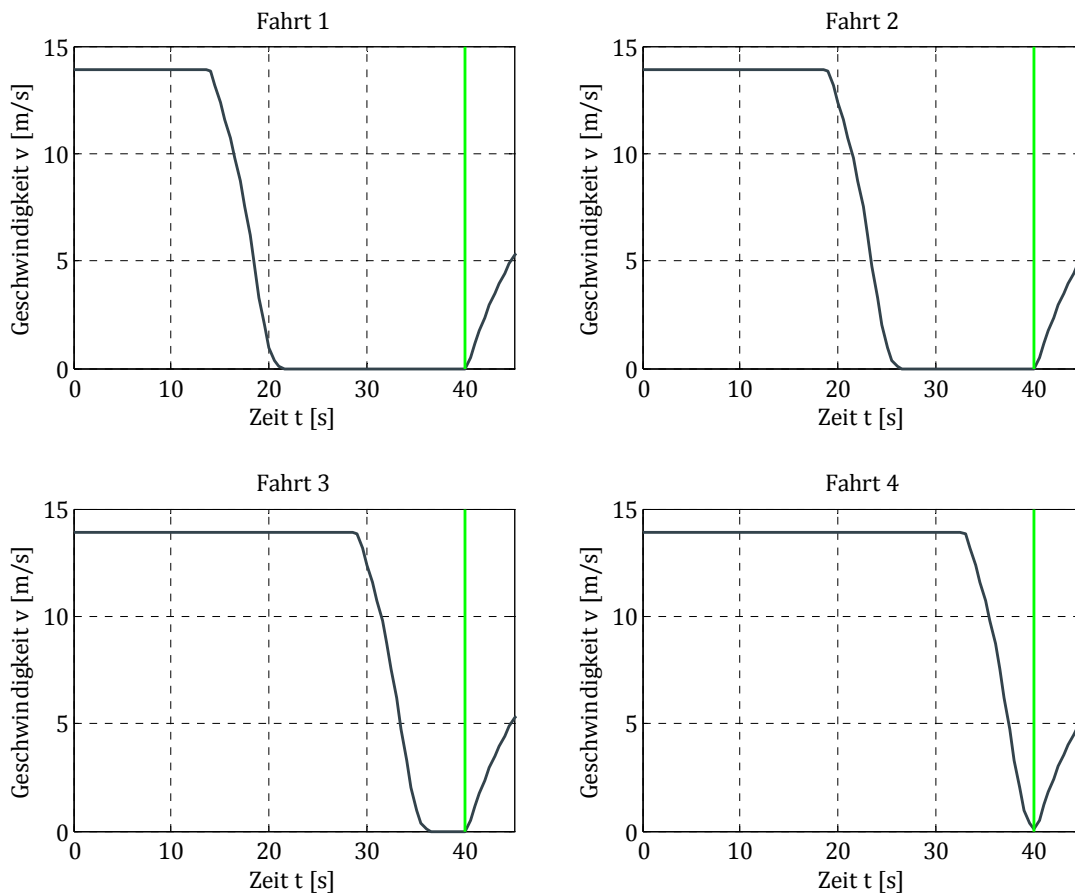


Abbildung 7-2: Geschwindigkeitsverläufe $v(t)$ über der Zeit t von Stopps an Lichtsignalanlagen

Tabelle 7-1 zeigt die gefahrenen Status Quo (SQ)-Durchschnittsgeschwindigkeiten \bar{v}_{SQ} sowie die zugehörige räumlich-zeitliche Straßenbelegung $F_{b,SQ}(\bar{v}_{SQ})$ und auch die Belegung für das nach Kapitel 5 ideale Fahrverhalten $F_{b,ideal}(\bar{v}_{ideal})$ auf dem betrachteten Abschnitt $s_2 - s_1 = 1191 \text{ m}$. Dieses im Sinne der räumlich-zeitlichen Effizienz theoretisch ideale Verhalten setzt eine grüne Lichtsignalanlage voraus; die Fahrer-Fahrzeug-Einheit fährt konstant mit der Geschwindigkeit $\bar{v}_{ideal} = 50 \text{ km/h}$. Die räumlich-zeitliche Straßenbelegung wurde jeweils mit den Parametern aus Abschnitt 5.1 berechnet.

Fahrt	\bar{v}_{SQ}	$F_{b,SQ}(\bar{v}_{SQ})$	$F_{b,ideal}(\bar{v}_{ideal})$
1	9,81 m/s	5759 m ² s	5117 m ² s
2	10,23 m/s	5669 m ² s	5117 m ² s
3	11,19 m/s	5489 m ² s	5117 m ² s
4	11,63 m/s	5421 m ² s	5117 m ² s

Tabelle 7-1: Durchschnittsgeschwindigkeiten des Status Quo \bar{v}_{SQ} und räumlich-zeitlich belegte Straßenflächen der vier Fahrten für den Status Quo $F_{b,SQ}(\bar{v}_{SQ})$ und das ideale Fahren $F_{b,ideal}(\bar{v}_{ideal})$

Aus dem Vergleich der räumlich-zeitlich belegten Straßenfläche des Status Quo und des idealen Fahrverhalten zeigt sich logischerweise, dass die erste Fahrt mit dem längsten Halt das größte Optimierungspotenzial besitzt. Da in allen vier Fahrten $F_{b,SQ} > F_{b,ideal}$ gilt, sowie aufgrund der durch die Lichtsignalanlage reduzierten Kapazität $q < q_{max}$, ergibt sich bei wartendem Rückstau mit $\rho > \rho_{krit}$ nach Abschnitt 5.5 eine Einsatzmöglichkeit für Verkehrsassistenzsysteme.

7.1.2 Systemauslegung und verwendete Modelle

Durch das frühzeitige Wissen über die aktuelle Ampelphase, die Phasenrestlaufzeit sowie über die Länge des wartenden Rückstaus kann ein Ampelassistenzsystem die Geschwindigkeit anpassen, um die Lichtsignalanlage ohne Halt zu passieren. Dadurch werden unnötige Anfahrvorgänge vermieden, die Geschwindigkeit harmonisiert, der Verkehrsfluss verbessert und letztlich auch der Kraftstoffverbrauch reduziert.

Um diese notwendige Vorausschau zu ermöglichen, wird im folgenden Beispiel eine Car-to-Infrastructure-Kommunikation (C2X) zwischen Fahrzeug und Lichtsignalanlage genutzt. Mit Hilfe dieser Kommunikation werden fahrstreifengenaue Daten bezüglich aktueller Ampelphase, deren Restlaufzeit sowie wartender Fahrzeuge übertragen. Dabei wird eine ideale Kommunikation modelliert, es werden zum Beispiel keine Abbrüche in der Kommunikation berücksichtigt.

Für die agierende Längsführung wird das mikroskopische „Intelligent Driver Model“ (IDM) [KES09] mit einer Anpassung für Adaptive Cruise Control-Systeme [KTH10] und damit für agierende Assistenzsysteme als Reglermodell verwendet. Nach [TK10] handelt es sich um das

einfachste vollständige und unfallfreie Modell, welches in allen Verkehrssituationen realistische Beschleunigungswerte und ein zumindest plausibles Beschleunigungsverhalten modelliert. Die Beschleunigung wird dabei durch

$$a_{IDM}(s, v, \Delta v) = a \left[1 - \left(\frac{v}{v_0} \right)^\delta - \left(\frac{s^*(v, \Delta v)}{s} \right)^2 \right] \quad \text{Gleichung 7-2}$$

mit

$$s^*(v, \Delta v) = s_0 + vT + \frac{v\Delta v}{2\sqrt{ab}} \quad \text{Gleichung 7-3}$$

berechnet. Dabei wird der aktuelle Abstand s mit dem geplanten Abstand s^* verglichen. Δv beschreibt die Relativgeschwindigkeit zur vorausfahrenden Fahrer-Fahrzeug-Einheit. Die im vorliegenden Modell verwendeten Parameter sowie die verwendete Notation nach [TK10] zeigt Tabelle 7-2.

IDM-Parameter	Werte
Wunschgeschwindigkeit v_0	50 km/h
Stillstandsabstand s_0	1 m
zeitlicher Sicherheitsabstand T	1,4 s
maximale Beschleunigung a	1,4 m/s ²
komfortable Bremsverzögerung b	2 m/s ²
Beschleunigungsexponent δ	4

Tabelle 7-2: Parameter und Werte des „Intelligent Driver Model“

Um das Verkehrsassistenzsystem in die Fahrzeug-Längsregelung zu implementieren, wird der Modellparameter „Wunschgeschwindigkeit“ durch die vom System berechnete Geschwindigkeit ersetzt. Dies geschieht analog zu einem menschlichen Fahrer, da dieser ebenfalls seine Wunschgeschwindigkeit aufgrund der aktuellen Verkehrssituation anpasst.

Für das agierende Ampelphasenassistenzsystem ohne Überwachung durch den Fahrer ergibt sich nach Abschnitt 4.2.3 der in Abbildung 7-3 gezeigte Regelkreis. Eingangsgrößen aus der Umwelt sind unter anderem die aktuelle Phase der Lichtsignalanlage und deren Restlaufzeit, sowie der Abstand und die Geschwindigkeit der vorausfahrenden Fahrer-Fahrzeug-Einheit. Daraus berechnet das Verkehrsassistenzsystem die zur Vermeidung eines Haltes geeignete Geschwindigkeit und gibt diese als Führungsgröße an den Regler. Dieser berechnet als Stellgröße die Beschleunigung a . Da in mikroskopischen Verkehrsflusssimulationen das Fahrzeug als Regelstrecke nicht berücksichtigt wird, wird die vom „Intelligent Driver Model“ berechneten Beschleunigung zur Geschwindigkeit integriert.

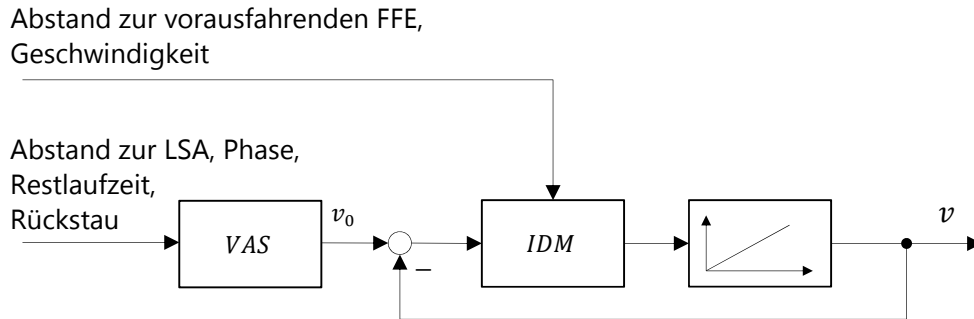


Abbildung 7-3: Regelkreis Fahrer-Fahrzeug mit einem agierenden Assistenzsystem ohne Überwachung durch den Fahrer mit der Wunschgeschwindigkeit v_0 und der gefahrene Geschwindigkeit v

Um eine möglichst hohe Durchschnittsgeschwindigkeit und damit entsprechend Kapitel 5 eine geringe räumlich-zeitliche Straßenbelegung zu erzielen, ist die Geschwindigkeit unmittelbar nach dem Empfang der Information per Car-to-Infrastructure-Kommunikation anzupassen. Die vom Verkehrsassistenzsystem berechnete Passiergeschwindigkeit kann dabei mit verschiedenen Strategien erreicht werden, eine Übersicht zeigt Abbildung 7-4.

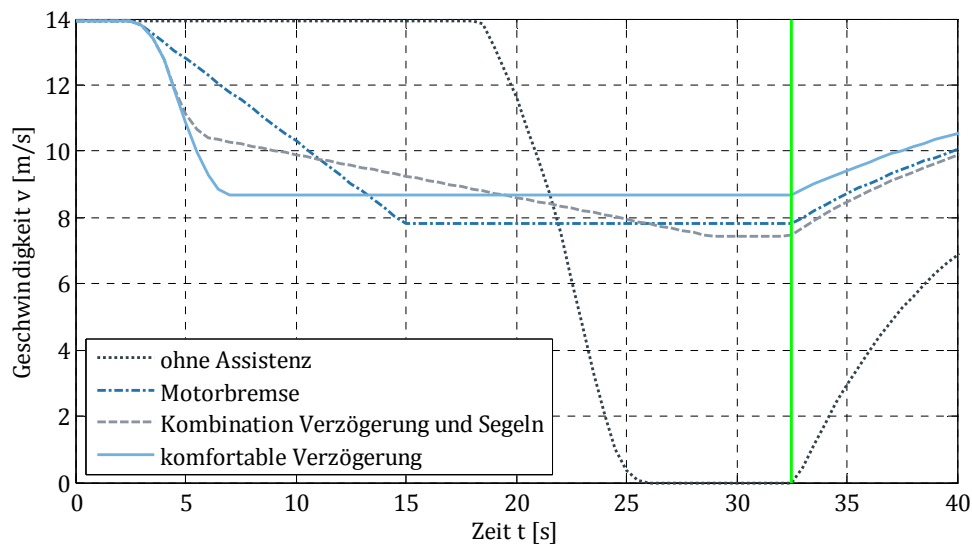


Abbildung 7-4: Variation der Verzögerung zum Erreichen der Passiergeschwindigkeit

Diese Geschwindigkeitsprofile können durch eine komfortable Verzögerung, die Motorbremse, das Segeln oder ein kombiniertes Manöver erreicht werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die scheinbar ideale Kombination (Motorbremse, Verzögerung und Segeln, komfortable Verzögerung bzw. Konstantfahrt) zu einem Passieren der noch roten Lichtsignalampel führt, da das Integral der Geschwindigkeit zu groß ist. Dies zeigt darüber hinaus die möglichen Zielkonflikte zwischen einer energieeffizienten sowie einer verkehrsoptimalen Annäherung. Die einzelnen Geschwindigkeitsprofile wurden basierend auf einem erweiterten IDM mit den

genannten Parametern simuliert. Dem Model werden dabei vorab berechnete Wunschgeschwindigkeitsprofile $v_0(t)$ vorgegeben. Die unterschiedlichen Beschleunigungen nach dem Umschalten der Lichtsignalanlage auf Grün zum Zeitpunkt $t = 32 \text{ s}$ resultieren aus dem jeweils unterschiedlichen Verhältnis $(v/v_0)^\delta$ aus gefahrener Geschwindigkeit v und Wunschgeschwindigkeit v_0 . Die resultierenden räumlich-zeitliche Straßenbelegungen zeigt Tabelle 7-3. Als Grundlage wird analog zu Tabelle 7-1 der Streckenabschnitt $s_2 - s_1 = 1191 \text{ m}$ ab dem Zeitpunkt $t = 0 \text{ s}$ bis $t = 40 \text{ s}$ verwendet.

Annäherungsstrategie	\bar{v}_{opt} bzw. \bar{v}_{SQ}	$F_{b,opt}(\bar{v}_{opt})$ bzw. $F_{b,SQ}(\bar{v}_{SQ})$
komfortable Verzögerung	11,65 m/s	5413 m ² s
Motorbremse	11,55 m/s	5429 m ² s
Kombination Verzögerung und Segeln	11,52 m/s	5434 m ² s
ohne Assistenz	10,88 m/s	5543 m ² s

Tabelle 7-3: Vergleich der Durchschnittsgeschwindigkeiten des optimierten \bar{v}_{opt} und des Status Quo Fahrens \bar{v}_{SQ} sowie der zugehörigen räumlich-zeitlich belegten Straßenflächen $F_{b,opt}(\bar{v}_{opt})$ bzw. $F_{b,SQ}(\bar{v}_{SQ})$

Da alle Fahrzeuge beim Umschalten der Lichtsignalanlage auf Grün an der Haltelinie sind, ist die Durchschnittsgeschwindigkeit der vier Geschwindigkeitsprofile bis zum Passieren der Haltelinie aufgrund des gleichen Anfangsabstandes und der gleichen Phasenrestlaufzeit über alle Strategien gleich. Daher ergeben sich die Unterschiede erst nach dem Überfahren der Haltelinie bis zum Verlassen des Simulationsszenarios. Es zeigt sich, dass die Annäherung mit der komfortablen Verzögerung aufgrund der maximalen Geschwindigkeit beim Passieren der Haltelinie und damit der höchsten Durchschnittsgeschwindigkeit in dem Szenario die im Vergleich geringste räumlich-zeitliche Straßenbelegung verursacht. Im Vergleich zur Trajektorie ohne Assistenz wird die Straßenbelegung gemessen an der Kenngröße F_b um 2,3 % reduziert. Daher wird diese Annäherungsstrategie im Folgenden beschrieben und im Rahmen der Simulationsuntersuchung verwendet.

Durch das Assistenzsystem ist grundsätzlich zu unterscheiden, ob sich die Fahrer-Fahrzeug-Einheit an eine rote oder eine grüne Lichtsignalanlage annähert. Eine gelbe Lichtsignalanlage wird im Folgenden wie eine rote bewertet und dementsprechend nur zwischen Grün und Rot unterschieden. Zeigt die Lichtsignalanlage Rot, kann basierend auf dem Abstand zur Haltelinie $s_{Haltelinie}$ und der Restrotzeit $t_{Restrot}$ die zu fahrende Passiergeschwindigkeit $v_{Grün}$ berechnet werden, um erst beim Umschalten auf Grün an der Haltelinie zu sein und somit einen Halt zu vermeiden. Unter der Voraussetzung, dass keine anderen Fahrzeuge vor der Haltelinie sind, gilt ortsfest für eine gleichförmige Bewegung

$$v_{Grün} = \frac{s_{Haltelinie}}{t_{Restrot}}. \quad \text{Gleichung 7-4}$$

Dabei gilt

$$v_{\text{Grün}} \neq \text{konst}, \quad \text{Gleichung 7-5}$$

da sich sowohl $s_{\text{Haltelinie}}$ als auch t_{Restrot} kontinuierlich über der Zeit ändern. Die berechnete Geschwindigkeit kann dabei für einen Abstand $s_{\text{Haltelinie}}$ und eine sehr große Phasenrestlaufzeit t_{Restrot} gegen Null gehen. Um ein solches Fahrverhalten und damit eine mögliche Nötigung der nachfolgenden Fahrer-Fahrzeug-Einheiten zu verhindern, wird für die weiteren Betrachtungen eine minimale Geschwindigkeit v_{min} definiert [HOY15]. Diese darf in der Annäherung nicht unterschritten werden. Wenn $v_{\text{Grün}} < v_{\text{min}}$ und damit die Passiergeschwindigkeit langsamer ist als die minimale Geschwindigkeit, kann der Halt nicht vermieden werden. Daraus folgt

$$v_0 = \begin{cases} v_{\text{Grün}}, & \text{wenn } v_{\text{Grün}} > v_{\text{min}}, \\ v_0, & \text{sonst.} \end{cases} \quad \text{Gleichung 7-6}$$

Im unteren Fall wird weiterhin mit der Wunschgeschwindigkeit v_0 gefahren und vor der Haltelinie an der roten Ampel angehalten.

Dieser skizzierte Fall ohne wartenden Rückstau ist jedoch eine Ausnahme, daher ist für die Berechnung der Passiergeschwindigkeit neben dem Abstand sowie der Restzeit die Rückstaulänge erforderlich. Bei n_{Fzg} Fahrzeugen zwischen der Fahrer-Fahrzeug-Einheit und der Haltelinie ergibt sich bei identischen Fahrzeuglängen und Stillstandsabständen für den Abstand bis zum Ende des Rückstaus

$$s_{\text{Rückstau}} = s_{\text{Haltelinie}} - n_{\text{Fzg}} \cdot (l_{\text{Fzg}} + s_0) \quad \text{Gleichung 7-7}$$

sowie unter Berücksichtigung der Anfahrverzögerung τ jeder Fahrer-Fahrzeug-Einheit die Zeit bis zum Anfahren des letzten wartenden Fahrzeugs

$$t_{\text{Rückstau}} = t_{\text{Restgrün}} + \tau \cdot n_{\text{Fzg}}. \quad \text{Gleichung 7-8}$$

Die Passiergeschwindigkeit berechnet sich damit aus

$$v_{\text{Grün}} = \frac{s_{\text{Rückstau}}}{t_{\text{Rückstau}}}. \quad \text{Gleichung 7-9}$$

Analog dazu ist bei der Annäherung an eine grüne Lichtsignalanlage die Geschwindigkeit v_{Rot} zu berechnen, bei der die Haltelinie vor dem Umschalten auf Rot erreicht wird:

$$v_{\text{Rot}} = \frac{s_{\text{Haltelinie}}}{t_{\text{Restgrün}}}. \quad \text{Gleichung 7-10}$$

Ist diese größer als die auf dem Streckenabschnitt maximal erlaubte Geschwindigkeit v_{max} , kann der Stopp durch ein Beschleunigungsmanöver nicht vermieden werden. Dann ist nach

Gleichung 7-9 zu prüfen, ob die Haltelinie durch ein Verzögerungsmanöver erst bei der nächsten Grünphase erreicht werden kann, um die Ampel ohne Halt zu passieren.

Durch die frühzeitige Kenntnis eines notwendigen Stopps kann ein gegebenenfalls notwendiger Anhaltvorgang beispielsweise energieoptimal durchgeführt werden. Dies wird aufgrund der Fokussierung auf die verkehrliche Wirkung nicht betrachtet. Dadurch werden in der Simulation die folgenden drei Fahrstrategien, welche in Abbildung 7-5 ersichtlich sind, durch das Assistenzsystem umgesetzt:

1. Freie Fahrt: Die Haltelinie kann mit der Wunschgeschwindigkeit passiert werden, die Geschwindigkeit muss nicht durch das Assistenzsystem angepasst werden.
2. Anhalten: Annäherung an eine rote oder grüne Lichtsignalanlage, die Überfahrt ist nicht möglich, da $v_{Grün} < v_{min}$ oder $v_{Rot} > v_{max}$ gilt.
3. Bremsen: Das Assistenzsystem reduziert die Wunschgeschwindigkeit durch eine komfortable Verzögerung auf die berechnete Passiergeschwindigkeit, im Gegensatz zu einem nicht mit dem Verkehrsassistenzsystem ausgestatteten Fahrzeug kann ein Halt vermieden werden.

In Abbildung 7-5 sind darüber hinaus die wesentlichen Parameter des Ampelassistenzsystems ersichtlich:

- die Funkreichweite ist diejenige Distanz zur Haltelinie, ab der die Informationen im Fahrzeug vorliegen und die Geschwindigkeit angepasst werden kann, im Beispiel 175 m,
- die minimale Passiergeschwindigkeit entspricht der langsamsten Geschwindigkeit mit der ein Halt vermieden werden kann und damit der geringsten Steigung, im Beispiel 7 m/s.

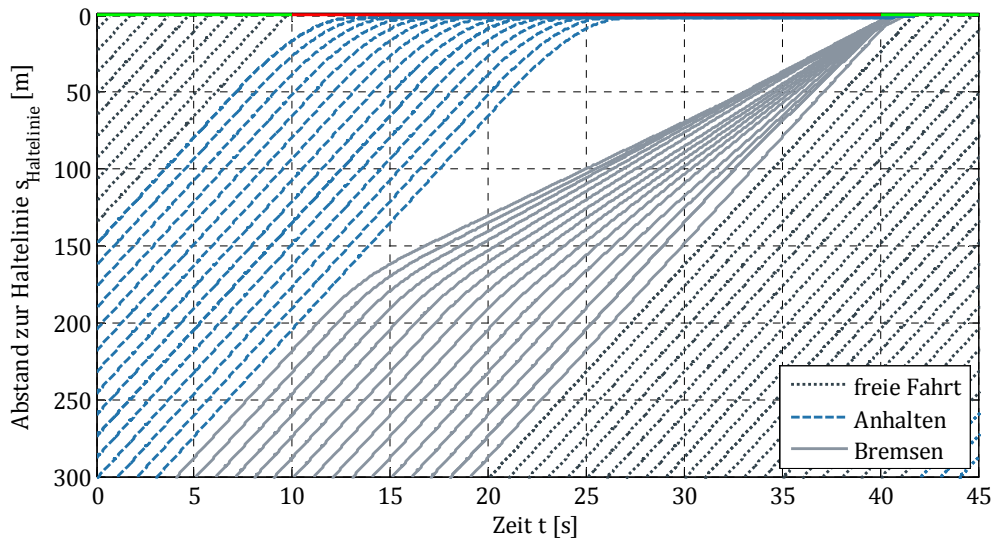


Abbildung 7-5: Darstellung der Fahrstrategien ohne Rückstau im Raum-Zeit-Diagramm mit eingezeichneter Ampelphase, dabei entspricht die Fahrzeuggeschwindigkeit der Steigung einer jeweiligen Linie

Somit kann die leere Fläche in Abbildung 7-5 als das Potenzial des Ampelassistenzsystems zur Vermeidung von Halten bezeichnet werden.

Für die verkehrliche Optimierung des Fahrverhaltens sind nach Abschnitt 5.2 zunächst die Systemparameter sowie deren Grenzen zu identifizieren. Neben den Parametern des IDM sind dies die minimale Geschwindigkeit sowie die Funkreichweite. Diese werden in der Simulationsbetrachtung variiert.

7.1.3 Simulationsbetrachtung

Für die Simulation wird das in Kapitel 6 entworfene Simulationswerkzeug verwendet, der in Abbildung 7-3 gezeigte Regelkreis wird in den Regelkreis einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation nach Abbildung 4-9 integriert. Für alle nicht mit dem Assistenzsystem ausgestatteten Fahrer-Fahrzeug-Einheiten wird das in SUMO implementierte Verhaltensmodell verwendet und damit ein einheitliches Fahrverhalten angenommen.

Für die Simulation des Ampelphasenassistenzsystems wird die Lichtsignalanlage am Knotenpunkt „Berliner Heerstraße / Alte Schulstraße“ in Braunschweig-Dibbesdorf betrachtet. Dieses Szenario wurde ausgewählt, da es sich um eine isolierte Lichtsignalanlage ohne Rückwirkungen durch umgebende Knotenpunkte handelt. Ein möglicher höherer Verkehrsfluss kann dementsprechend ungehindert abfließen. Weiterhin hat dieser Knotenpunkt im morgendlichen Berufsverkehr von Braunschweig nach Wolfsburg eine ausreichend große Verkehrsnachfrage mit Rückstauphasen an der Lichtsignalanlage, um die verkehrliche Wirkung des Assistenzsystems untersuchen zu können. Abbildung 7-6 zeigt das verwendete SUMO-Verkehrsszenario.

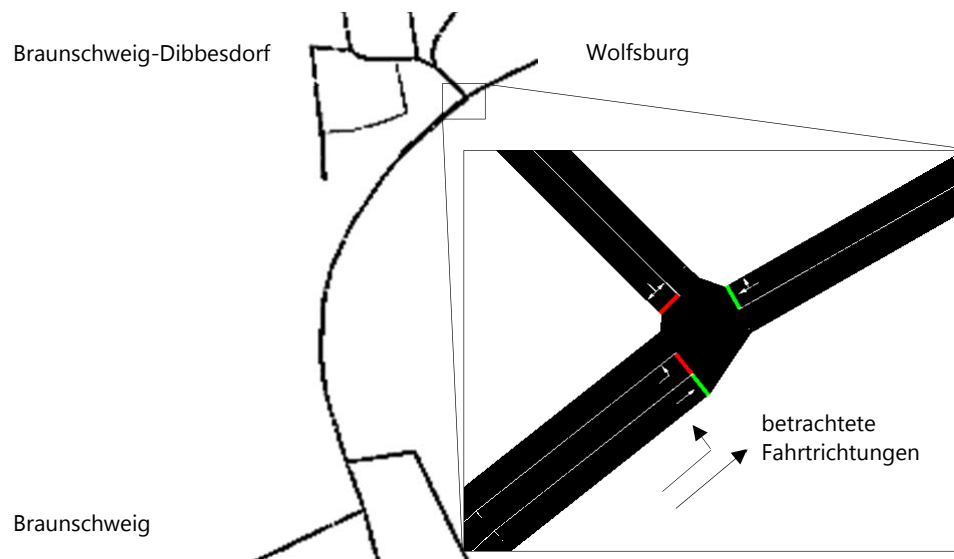


Abbildung 7-6: SUMO-Verkehrsszenario der Simulationsbetrachtung

Das Simulationsszenario wurde basierend auf realen Daten des typischen morgendlichen Berufsverkehrs von Braunschweig in Fahrtrichtung Wolfsburg kalibriert. Dafür wurden sowohl der Verkehr als auch die Umschaltzeitpunkte der Lichtsignalanlage per Video aufgenommen. In der betrachteten halben Stunde haben 462 Fahrzeuge den Knotenpunkt in Richtung Wolfsburg beziehungsweise Braunschweig-Dibbesdorf passiert. Die ermittelten Daten sind in Anhang B aufgeführt. Der Verkehr in Richtung Braunschweig wurde aufgrund der geringen Verkehrsnachfrage nicht betrachtet. Die Fahrstrecke der Fahrer-Fahrzeug-Einheiten in dem Simulationsszenario beträgt 900 m, davon liegen 260 m hinter der Haltelinie.

Im Rahmen der Simulationsbetrachtung wurden die in Tabelle 7-4 zusammengefassten Parameter variiert. Die jeweils ausgestatteten Fahrzeuge wurden durch Zufallsvektoren ausgewählt, pro Ausstattungsrate wurden fünf Durchläufe mit variierenden Vektoren durchgeführt. Die resultierenden Ergebnisse werden per Mittelwertbildung bestimmt. Weiterhin wird eine Status-Quo-Fahrt ohne ausgestattete Fahrer-Fahrzeug-Einheiten als Referenz simuliert.

Parameter	Werte
minimale Geschwindigkeit v_{min}	0 km/h; 25 km/h; 40 km/h
Funkreichweite r_F	200 m; 250 m; 300 m; 350 m; 400 m; 450 m; 500 m; 550 m; 600 m
Ausstattungsrate A_{VAS}	0%, 10%, 20%, 50%, 100%

Tabelle 7-4: Variierte Parameter der Simulation

Für die Parameter des Rückstaus werden in der Simulation $l_{Fzg} = 5 \text{ m}$, $s_0 = 1 \text{ m}$ und $\tau = 1 \text{ s}$ angenommen.

Um den Verkehrsfluss in der Hauptverkehrsrichtung nicht durch das Assistenzsystem zu reduzieren, passen die nach Links in Fahrtrichtung Dibbesdorf abbiegenden Fahrzeuge die Geschwindigkeit im betrachteten Modell erst auf dem Abbiegefahrstreifen an.

7.1.4 Bewertung der verkehrlichen Auswirkungen

Um die verkehrlichen Auswirkungen des Ampelphasenassistenzsystems in dem obigen Verkehrsszenario zu bewerten, wird zunächst die räumlich-zeitlich belegte Straßenfläche

$$F_b(\bar{v}) = (s_{quer,ges} + b_{Fzg}) \cdot (s_{0,längs} + l_{Fzg}) \cdot \left(\frac{s_2 - s_1}{\bar{v}} \right) + (s_{quer,ges} + b_{Fzg}) \cdot t_{zeitlücke} \cdot (s_2 - s_1)$$

Gleichung 7-11

in dem gesamten Verkehrsszenario betrachtet. Die in Abbildung 7-7 prozentual auf den Status Quo bezogene relative räumlich-zeitlich-belegten Straßenfläche $F_{b,rel}$ wurde basierend auf einer Mittelwertbildung bestimmt. Der Mittelwert wurde unter Berücksichtigung aller, also

auch der nicht ausgestatteten Fahrer-Fahrzeug-Einheiten, eines Simulationsszenarios bestimmt.

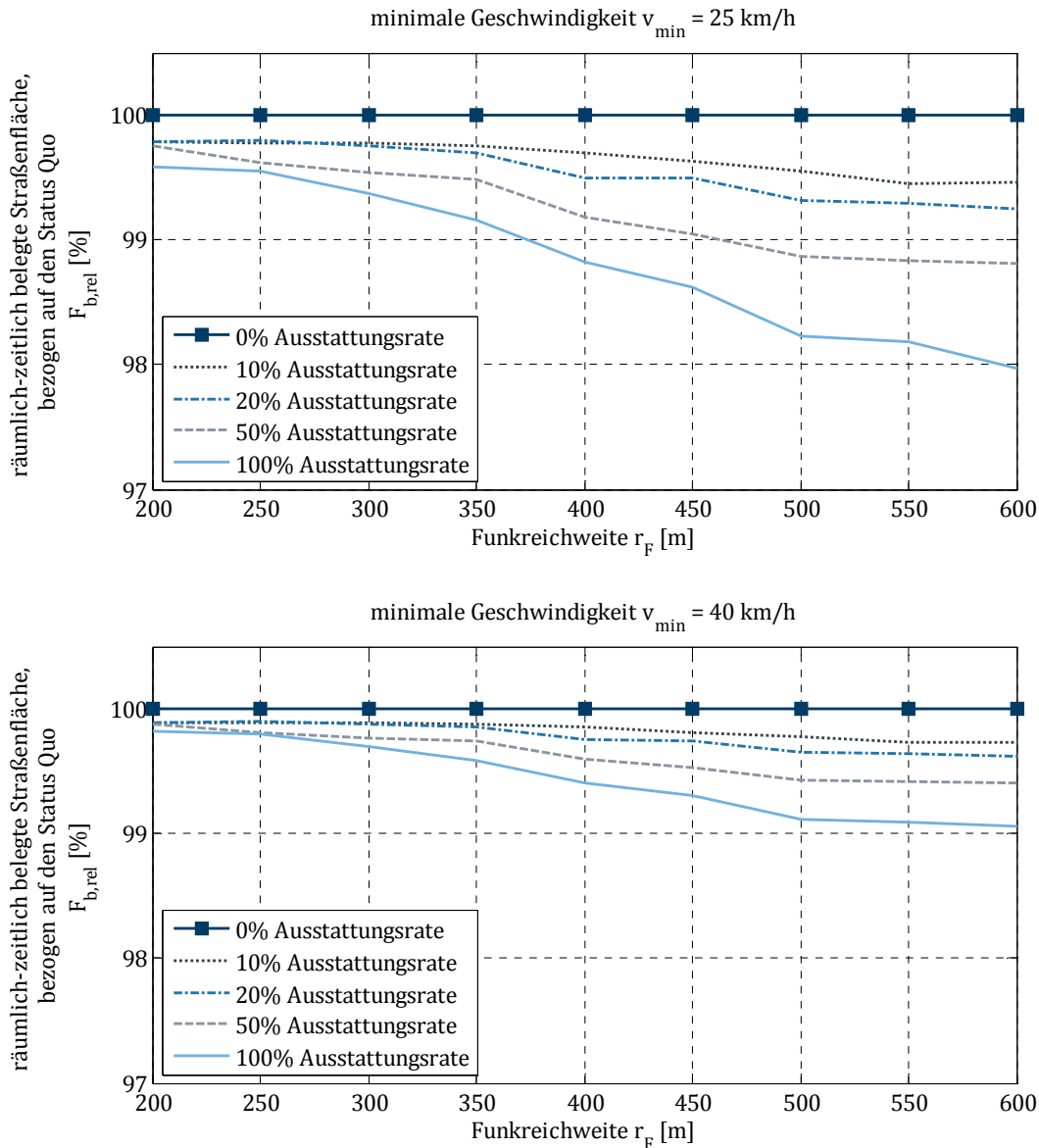


Abbildung 7-7: Relative räumlich-zeitlich belegte Straßenfläche $F_{b,rel}$ der Fahrer-Fahrzeug-Einheiten über der Funkreichweite r_f in Abhängigkeit der minimalen Geschwindigkeit v_{\min}

Aufgrund der festen Schaltzeitpunkte der Lichtsignalanlage und dem gleichen Anfangsabstand zu dieser, belegt eine Fahrer-Fahrzeug-Einheit in unterschiedlichen Simulationsläufen mit identischer Funkreichweite bis zur Haltelinie immer die gleiche räumlich-zeitliche Straßenfläche. Dabei ist es nicht relevant, ob die Fahrer-Fahrzeug-Einheit mit einem Assistenzsystem ausgestattet ist oder nicht. Daher basiert die Reduktion analog der Betrachtung der verschiedenen Annäherungsstrategien auf der veränderten Durchschnittsgeschwindigkeit nach dem Passieren der Haltelinie. Trotz dieser Randbedingung ist eine maximale Reduktion der räumlich-zeitlich belegten Straßenfläche bei $v_{\min} = 25 \text{ km/h}$ und $r_f = 600 \text{ m}$ um ca. 2 %

möglich. Dies entspricht einer um 5,2 % bzw. 3,6 km/h gesteigerten Durchschnittsgeschwindigkeit. Somit wurde die verkehrliche Effizienz entsprechend der Definition in Abschnitt 5.3 gesteigert:

$$Q_{Status-Quo}(\bar{v}_{opt}, \bar{v}_{SQ}) = \frac{F_{b,opt}(\bar{v}_{opt})}{F_{b,SQ}(\bar{v}_{SQ})} = 97,9 \% . \quad \text{Gleichung 7-12}$$

Die Abschätzung der Auswirkungen auf den Verkehr ergibt nach Kapitel 0 aufgrund der veränderten Durchschnittsgeschwindigkeit für den mittleren Verkehrsfluss

$$Q_m = \frac{q_{m,opt}}{q_{m,SQ}} = 1,02 \quad \text{Gleichung 7-13}$$

und für die mittlere Verkehrsdichte

$$P_m = \frac{\rho_{m,opt}}{\rho_{m,SQ}} = 0,96 . \quad \text{Gleichung 7-14}$$

Dies bedeutet, dass aufgrund der veränderten Durchschnittsgeschwindigkeit der mittlere Verkehrsfluss durch das Ampelphasenassistenzsystem um 2 % gesteigert wird, die Verkehrsdichte um 4 % sinkt. Diese Abschätzung berücksichtigt wie in Kapitel 5 angeführt keine möglichen Wechselwirkungen zwischen Fahrer-Fahrzeug-Einheiten. Aufgrund der nicht variierten Verkehrsnachfrage kann in der Simulation keine Verkehrsflusssteigerung gemessen werden.

Bei einer Erhöhung der minimalen Passiergeschwindigkeit und / oder Reduktion der Funkreichweite reduziert sich die verkehrliche Wirkung, da das Ampelphasenassistenzsystem immer weniger Halte vermeiden kann.

Die Verbesserung des Verkehrs steigert sich jedoch weiter, wenn nur der Bereich nach dem Überfahren der Haltelinie und damit der eigentliche Wirkbereich des Ampelassistenzsystems betrachtet wird, vergleiche Abbildung 7-8.

In diesem Bereich ist eine maximale Reduktion der räumlich-zeitlich belegten Straßenfläche bei $v_{min} = 25 \text{ km/h}$ und $r_f = 600 \text{ m}$ von ca. 5 % möglich. Dies entspricht einer um 10,9 % bzw. 5,1 km/h gesteigerten Durchschnittsgeschwindigkeit, damit ergibt sich folgende verkehrliche Effizienz:

$$Q_{Status-Quo}(\bar{v}_{opt}, \bar{v}_{SQ}) = 95,1\% . \quad \text{Gleichung 7-15}$$

Es gilt analog für die Abschätzung der Auswirkungen auf den mittleren Verkehrsfluss

$$Q_m = 1,05 \quad \text{Gleichung 7-16}$$

und für die mittlere Verkehrsdichte ergibt sich

$$P_m = 0,93.$$

Gleichung 7-17

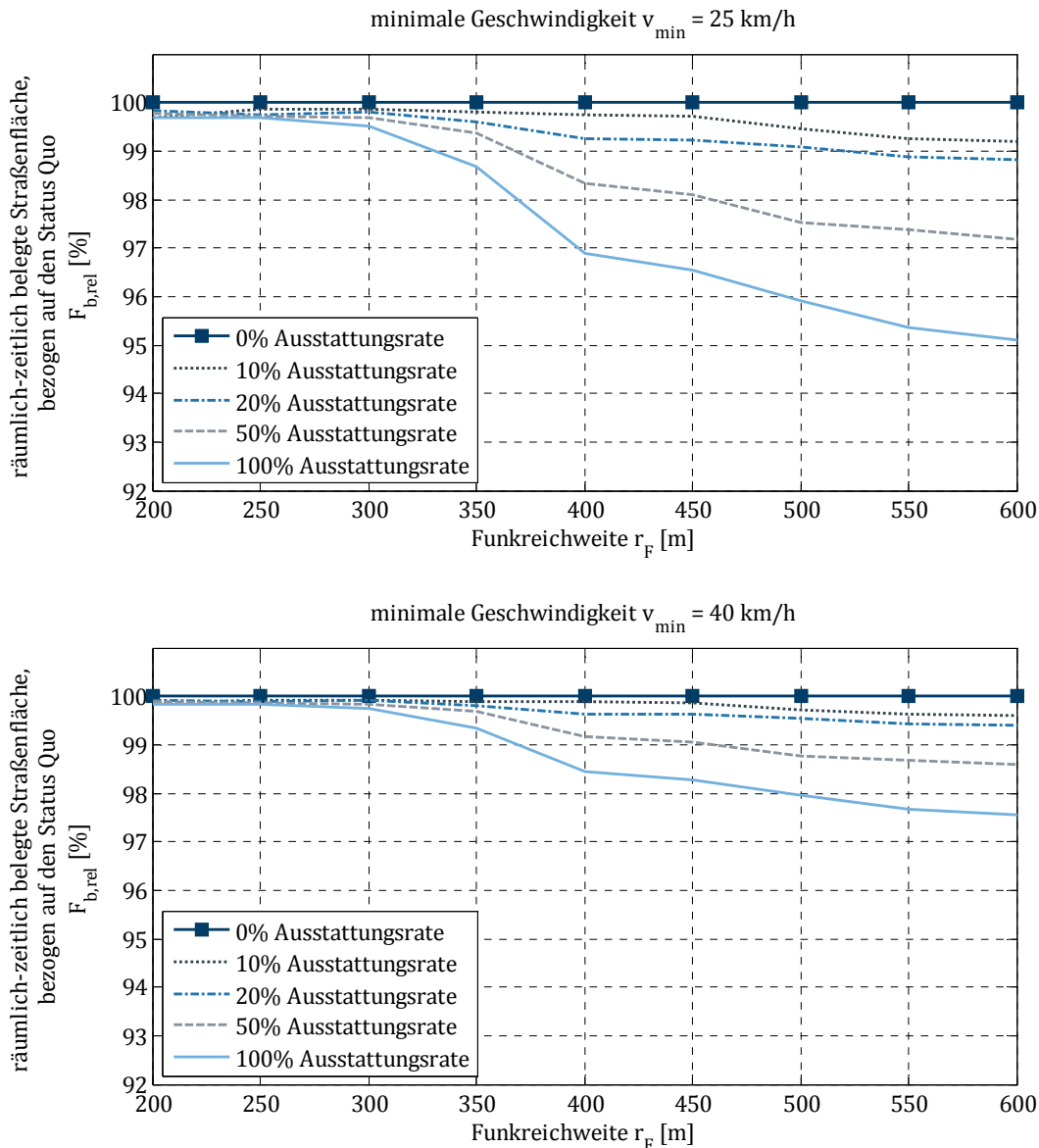


Abbildung 7-8: Relative räumlich-zeitlich belegte Straßenfläche $F_{b,rel}$ der Fahrer-Fahrzeug-Einheiten nach dem Passieren der Haltelinie über der Funkreichweite r_f in Abhängigkeit der minimalen Geschwindigkeit v_{\min}

Abbildung 7-9 zeigt die Anzahl an Stopps in Abhängigkeit der Ausstattungsrate, der minimalen Passiergeschwindigkeit und der Funkreichweite. Es zeigt sich, dass insbesondere bei einer niedrigen minimalen Passiergeschwindigkeit und einer hohen Funkreichweite bis zu 75 % aller Halte vermieden werden können. Dies zeigt das enorme verkehrliche Potenzial eines Ampelphasenassistenzsystems auf. Die bei 100 % Ausstattungsrate noch vorhandenen 55 Halte bei einer Funkreichweite von 600 m sind sämtlich in Fahrtrichtung Dübbersdorf und re-

sultieren aus der in 7.1.3 beschriebenen Auslegung des Assistenzsystems. Aufgrund der Kombination des kurzen Abbiegefahrstreifens und langen Rotphasen können dort nicht alle Stopps vermieden werden.

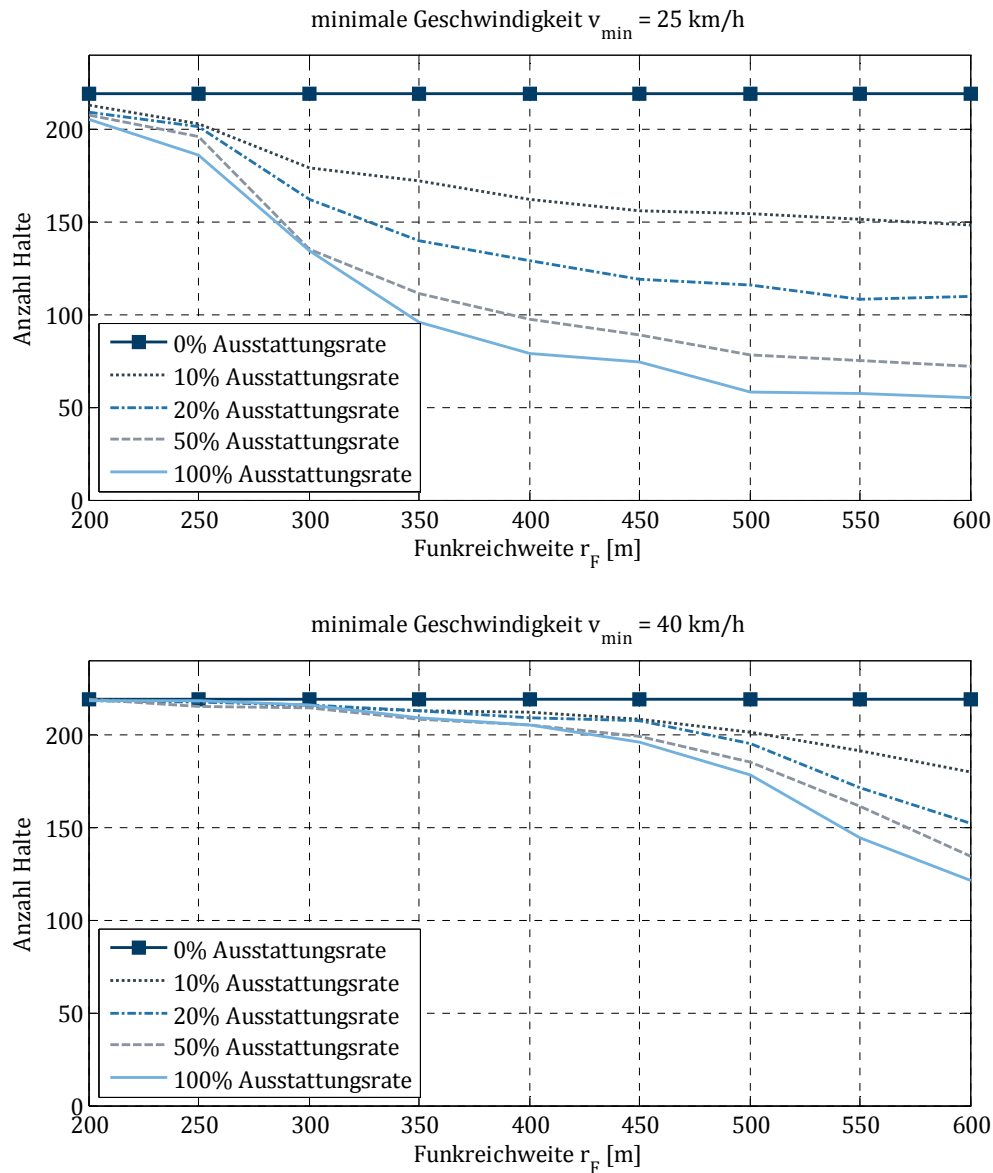


Abbildung 7-9: Anzahl der Halte über der Funkreichweite r_F in Abhängigkeit der minimalen Geschwindigkeit v_{\min}

Als Maß für die Harmonisierung der Geschwindigkeit und als Indikator für den Kraftstoffverbrauch wird abschließend das Integral aller positiven Beschleunigungen über der Zeit betrachtet. Abbildung 7-10 zeigt diese Kenngröße prozentual bezogen auf die Status Quo-Fahrt, wieder ermittelt durch eine Mittelwertbildung über alle Fahrer-Fahrzeug-Einheiten. Hier bestätigt sich die zunehmende Harmonisierung der Geschwindigkeit mit wachsender Ausstattungsrate. Die positiven Beschleunigungen $\int (a > 0) dt$ können um bis zu 41 % reduziert werden. Die auf eine Fahrer-Fahrzeug-Einheit bezogene Reduktion kann sogar deutlich höher sein, wenn diese analog Abbildung 7-4 ohne Assistenzsystem gerade noch anhalten, aber mit

System die Geschwindigkeit nur minimal anpassen muss. Somit besitzt ein Ampelassistenzsystem neben der Steigerung des Verkehrsflusses auch ein enormes Potenzial zur Kraftstoffreduktion.

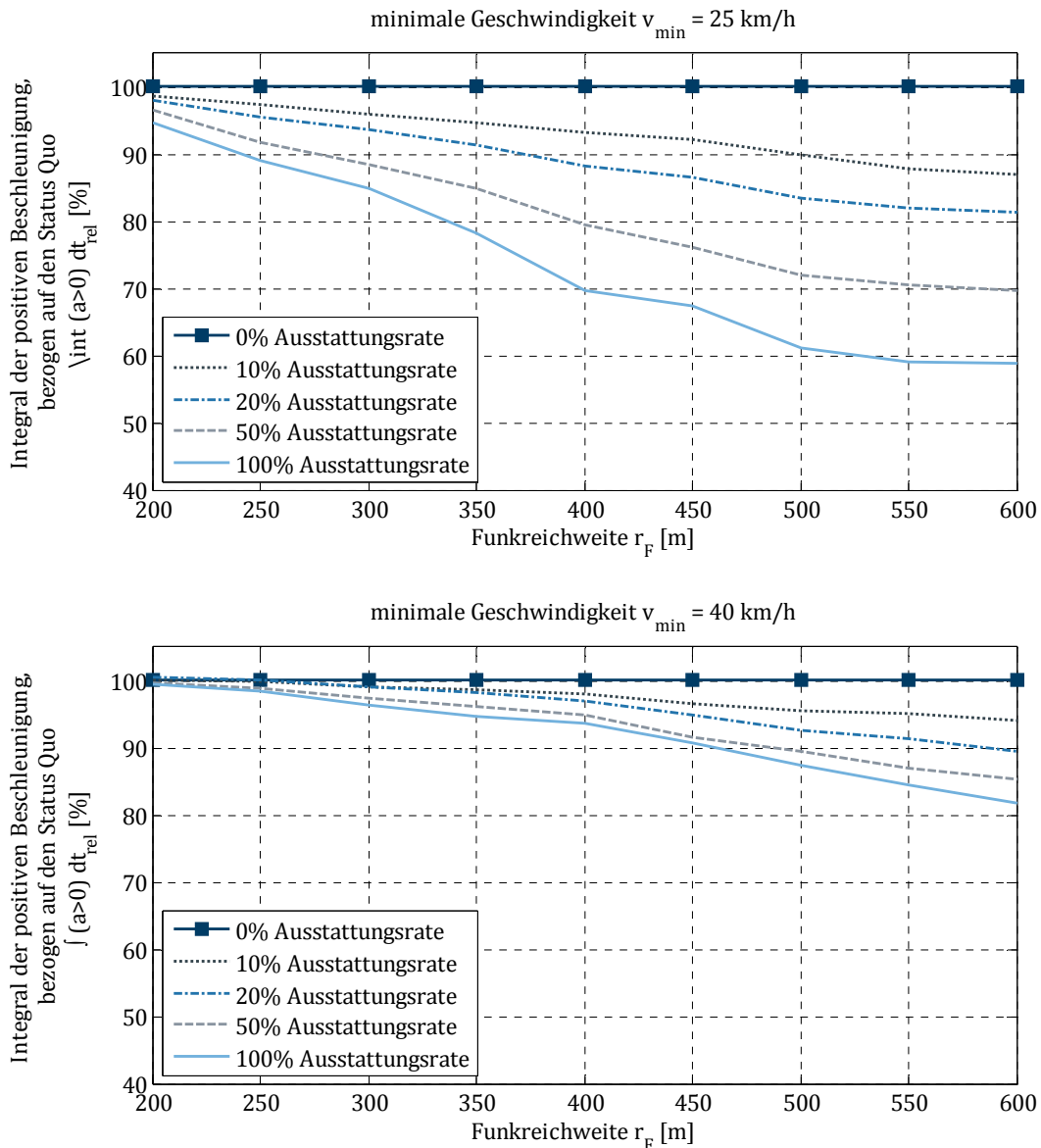


Abbildung 7-10: Relatives Integral der positiven Beschleunigungen $\int (a > 0) dt_{\text{rel}}$ über der Funkreichweite r_F in Abhängigkeit der minimalen Geschwindigkeit v_{\min}

Zusammenfassend besitzt das Ampelphasenassistenzsystem durch die signifikante Reduktion der Halte ein großes Potenzial zur Steigerung des Verkehrsflusses. Durch die Minimierung der positiven Beschleunigungen kann der Kraftstoffverbrauch nennenswert reduziert sowie der Geschwindigkeitsverlauf harmonisiert werden. Entsprechend Kapitel 3 ist dies neben der Vermeidung von Stopps eine der wesentlichen Wirkungsmöglichkeiten von verkehrsoptimierenden Assistenzsystemen zur langfristigen Optimierung des Verkehrsflusses.

Durch die Verringerung der Geschwindigkeitsvolatilität und der Steigerung des Verkehrsflusses werden die individuellen Vorteile wie zum Beispiel ein aufgrund der reduzierten Beschleunigungen verringerter Kraftstoffverbrauch zeitgleich mit positiven verkehrlichen Auswirkungen ermöglicht.

7.1.5 Validierung in der Praxis

Das Ampelphasenassistenzsystem wurde im Rahmen der Anwendungsplattform Intelligente Mobilität des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt [AIM14a] [AIM14b] im realen Straßenverkehr validiert. Dazu wurde seitens der Volkswagen AG ein Versuchsfahrzeug mit einer agierenden Fahrzeug-Längsführung, welche durch das Assistenzsystem beeinflusst werden kann, sowie einer Car-to-Infrastructure-Kommunikation für den Datenaustausch mit der Lichtsignalanlage zur Verfügung gestellt.

Die Validierung simulierter Fahrerassistenzsysteme in der Praxis ist notwendig, um die Übertragbarkeit der Algorithmen und Simulationsergebnisse in den realen Verkehr zu bewerten. Dafür werden im Folgenden reale Messfahrten simulierten Geschwindigkeitsprofilen gegenübergestellt.

Die realen Messdaten wurden während der Annäherung an den Knotenpunkt „Hans-Sommer-Straße / Langer Kamp“ aus Richtung Berliner Heerstraße in Fahrtrichtung Hagenring in Braunschweig aufgenommen. Dieser wurde im Rahmen der Anwendungsplattform Intelligente Mobilität mit einer Car-to-Infrastructure Kommunikation ausgestattet. Für die Validierung wurden insgesamt 102 Messfahrten aufgenommen.

Der erste wesentliche Parameter für die verkehrliche Wirksamkeit ist die Funkreichweite und damit das frühzeitige Wissen über den Status der Lichtsignalanlage und somit der aktuellen Phase sowie deren Restlaufzeit. Die während der Messfahrten ermittelten Funkreichweiten sind in Tabelle 7-5 zusammengefasst. Die Werte variieren unter anderem aufgrund des Wetters, beispielsweise können Regen oder eine hohe Luftfeuchtigkeit die Reichweite reduzieren [BUR13].

Parameter	Werte
minimale Reichweite	240 m
maximale Reichweite	410 m
mittlere Funkreichweite	333 m
Standardabweichung	22 m

Tabelle 7-5: Gemessene Funkreichweiten während der Messfahrten

Der Vergleich mit den Simulationsergebnissen aus dem vorherigen Abschnitt zeigt, dass bereits mit einer mittleren Funkreichweite von 333 m eine signifikante Verkehrsverbesserung möglich ist.

Die Annäherung an eine rote Lichtsignalanlage setzt sich aus einem Verzögerungsmanöver auf die vom Assistenzsystem berechnete Passiergeschwindigkeit und einer Fahrt mit entsprechender konstanter Geschwindigkeit zusammen. Um die realen und simulierten Geschwindigkeitsverläufe miteinander zu vergleichen, wird die durchschnittliche Verzögerung in Abhängigkeit der Differenz Δv_p betrachtet:

$$\Delta v_p := v - v_{Grün}. \quad \text{Gleichung 7-18}$$

Dabei ist v die zum Zeitpunkt des Empfangs der Lichtsignalanlagen-Informationen gefahrene Geschwindigkeit und $v_{Grün}$ die Passiergeschwindigkeit. Damit bildet Δv_p die in der Realität nicht mögliche ortsfeste Betrachtung nach Gleichung 7-4 ab.

Für den in Abbildung 7-11 gezeigten Vergleich wurden die in den Realfahrten gemessenen Differenzgeschwindigkeiten Δv_p basierend auf dem „Intelligent Driver Model“ und den Algorithmen aus Abschnitt 7.1.2 simuliert. Dabei sind die durchschnittlichen Verzögerungen über Δv_p sowie jeweils eine Ausgleichsgerade für die realen und simulierten Fahrten dargestellt.

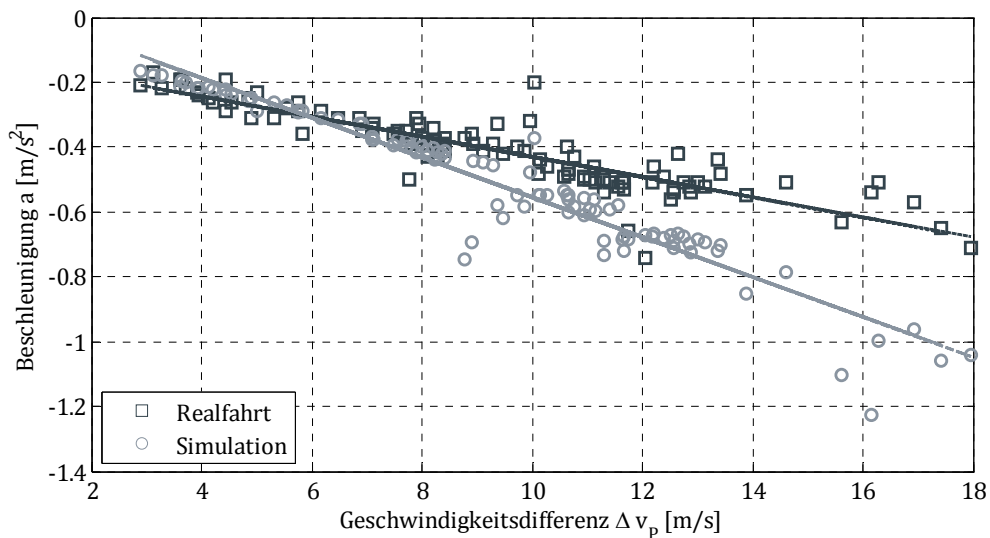


Abbildung 7-11: Durchschnittliche Verzögerungen a in Realfahrten und simulierten Geschwindigkeitsverläufen über der Relativgeschwindigkeit Δv_p

Der Vergleich zeigt eine gute Übereinstimmung der durchschnittlichen Verzögerungen. Die unterschiedlichen mittleren Verzögerungen für Realfahrten oder Simulationen bei gleichen Δv_p resultieren aus dem Faktor $v/v_{Grün}$.

Ab einer Differenz von $\Delta v_p = 6 \text{ m/s}$ wird in der Simulation stärker verzögert und die Passiergeschwindigkeit schneller erreicht. Somit ist die Geschwindigkeit beim Überfahren der Haltelinie größer.

Jedoch hat selbst die bei höheren Δv ermittelte Abweichung keinen nennenswerten Einfluss auf die Passiergeschwindigkeit, vergleiche Abbildung 7-12 für ca. $\Delta v = 18 \text{ m/s}$. Eine Berech-

nung basierend auf einer Funkreichweite von $r_F = 320 \text{ m}$ und einer Phasenrestlaufzeit von $t_{Restrot} = 40 \text{ s}$ mit den durchschnittlichen Verzögerungen $a_{sim} = 1,05 \text{ m/s}^2$ sowie $a_{real} = 0,7 \text{ m/s}^2$ ergibt eine Geschwindigkeitsdifferenz an der Haltelinie von $\Delta v_P = 1,1 \text{ km/h}$.

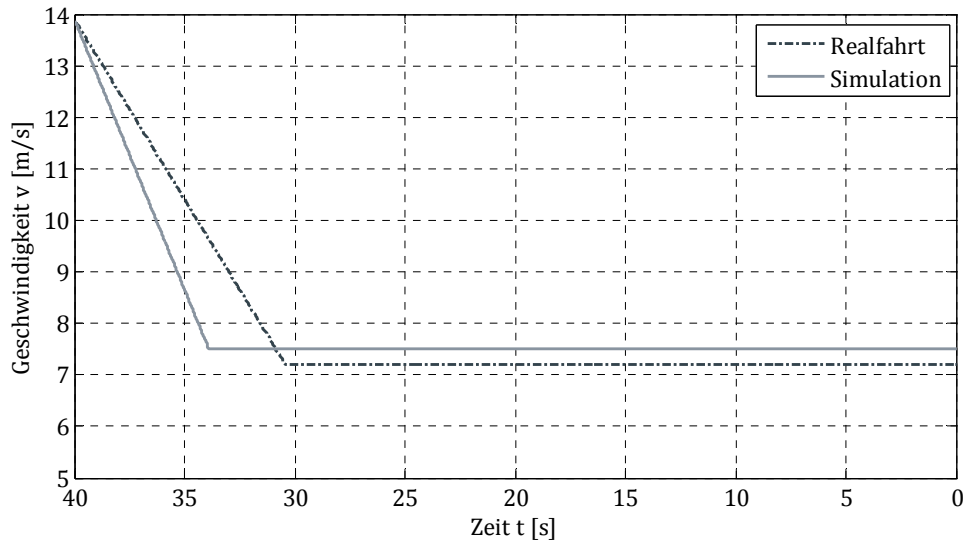


Abbildung 7-12: Berechnete Geschwindigkeitsverläufe $v(t)$ basierend auf den durchschnittlichen Verzögerungen aus Realfahrt und Simulation über der Zeit t

Abschließend werden im Folgenden ein reales und ein simuliertes Geschwindigkeitsprofil gegenübergestellt, siehe Abbildung 7-13. Sowohl in der Realfahrt als auch in der Simulation empfängt das Fahrzeug die Informationen der Lichtsignalanlage zum Zeitpunkt $t = 16 \text{ s}$. Während der Realfahrt wurden die Messdaten mit 1 Hz aufgezeichnet. Die Abbildung zeigt deutlich, dass das simulierte Geschwindigkeitsprofil im Laufe der Zeit gegen die Passiergeschwindigkeit konvergiert, die Fahrer-Fahrzeug-Einheit in der Realität aber langsamer fährt.

Dieses Verhalten ist die Folge der Systemparametrierung im realen Fahrzeug: Damit der Fahrer vor dem Passieren der Haltelinie noch die grüne Lichtsignalanlage sieht und die Linie nicht genau zum Umschaltzeitpunkt überfährt, wurde ein Sicherheitsoffset von 3 s auf die Phasenrestlaufzeit addiert. Jedoch zeigt sich auch in diesem Vergleich, dass die Verzögerung von der Ausgangsgeschwindigkeit bis zum Erreichen der Passiergeschwindigkeit zwischen Realfahrt und Simulation ähnlich ist.

Aufgrund der gezeigten Vergleichbarkeit von simuliertem und realem Verzögerungsverhalten ist davon auszugehen, dass unter identischen Radbedingungen in Simulation und Realität, zum Beispiel hinsichtlich Funkreichweite und Güte der Rückstauschätzung, im realen Verkehr übereinstimmende Optimierungen hinsichtlich Verkehrsfluss und Reduktion von positiven Beschleunigungen möglich sind.

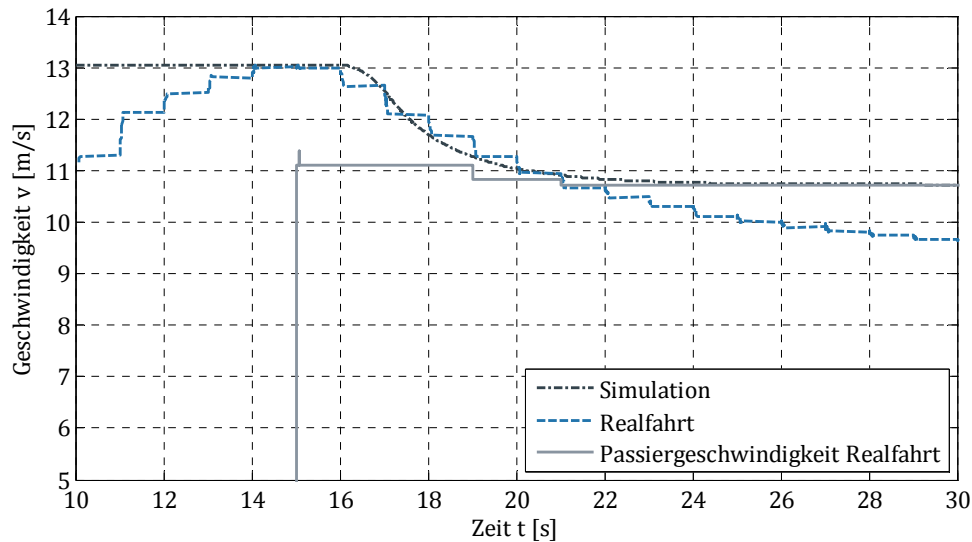


Abbildung 7-13: Vergleich eines realen und eines simulierten Geschwindigkeitsverlaufes $v(t)$ über der Zeit t

7.2 Vorausschauendes Stauassistenzsystem

Ein Stauassistenzsystem übernimmt in Stausituationen die Fahrzeugführung in Längsrichtung und gegebenenfalls in Querrichtung. Ein solches Assistenzsystem wird aktuell von vielen Automobilherstellern entwickelt und ist bereits käuflich erhältlich [BMW15b], [DAI15], [AUD15c], [VW15]. Das Ziel dieser Systeme liegt aber bisher ausschließlich in der Komfortsteigerung für den Fahrer. Die Adressierung einer verkehrlichen Optimierung durch ein Stauassistenzsystem ist nicht bekannt.

Bereits in dem Forschungsprojekt „Invent“ (vgl. Kapitel 1.2) wurde ein Stauassistent [INV06a], [ZSB04] entworfen und hinsichtlich der verkehrlichen Auswirkungen mit Hilfe einer Verkehrsflusssimulation untersucht [INV06b]. Grundsätzliche Ziele eines solchen Systems sind das Vermeiden von starken Verzögerungsmanövern, das Einhalten der idealen Abstände zu vorausfahrenden Fahrer-Fahrzeug-Einheiten sowie die Harmonisierung der Geschwindigkeit.

Zur Bestimmung des verkehrlichen Potenzials wird im Folgenden ein agierendes Stauassistenzsystem ohne eine Überwachung durch den Fahrer sowie ohne Berücksichtigung von Fahrstreifenwechseln untersucht.

Eine nicht-überholbare, vorausfahrende Fahrer-Fahrzeug-Einheit stellt ein begrenzendes Hindernis, analog zu einer roten Lichtsignalanlage, dar. Da die Durchschnittsgeschwindigkeit durch das vorausschauende Stauassistenzsystem somit nicht gesteigert werden kann, lässt sich basierend auf den Simulationsergebnissen des Ampelphasenassistenzsystems bereits abschätzen, dass die räumlich-zeitlich belegte Straßenfläche nicht reduziert wird. Stattdessen ist es insbesondere im Stau das Ziel, den Geschwindigkeitsverlauf zu harmonisieren.

7.2.1 Verkehrliche Problemstellung und betrachtetes Szenario

Während eines Staus ist die Verkehrsdichte größer als die kritische Dichte, wodurch der Verkehrsfluss unterhalb der möglichen Kapazität liegt. Die Fahrer-Fahrzeug-Einheiten befinden sich in gebundenem Verkehr und können nicht mit ihrer Wunschgeschwindigkeit fahren.

Für die Beschreibung der verkehrlichen Problemstellung und die anschließende Untersuchung des Stauassistentensystems in der Simulation werden die vier in Abbildung 7-14 gezeigten Geschwindigkeitsprofile von Messfahrten verwendet. Die ersten drei Profile wurden im morgendlichen Berufsverkehr zwischen dem Kreuz Wolfsburg / Königslutter (A2 / A39) und Wolfsburg aufgenommen. Die letzte Messfahrt ist synthetisch, sie wurde aus überlagerten Sinusschwingungen erzeugt und stellt ein verallgemeinertes Geschwindigkeitsprofil dar.

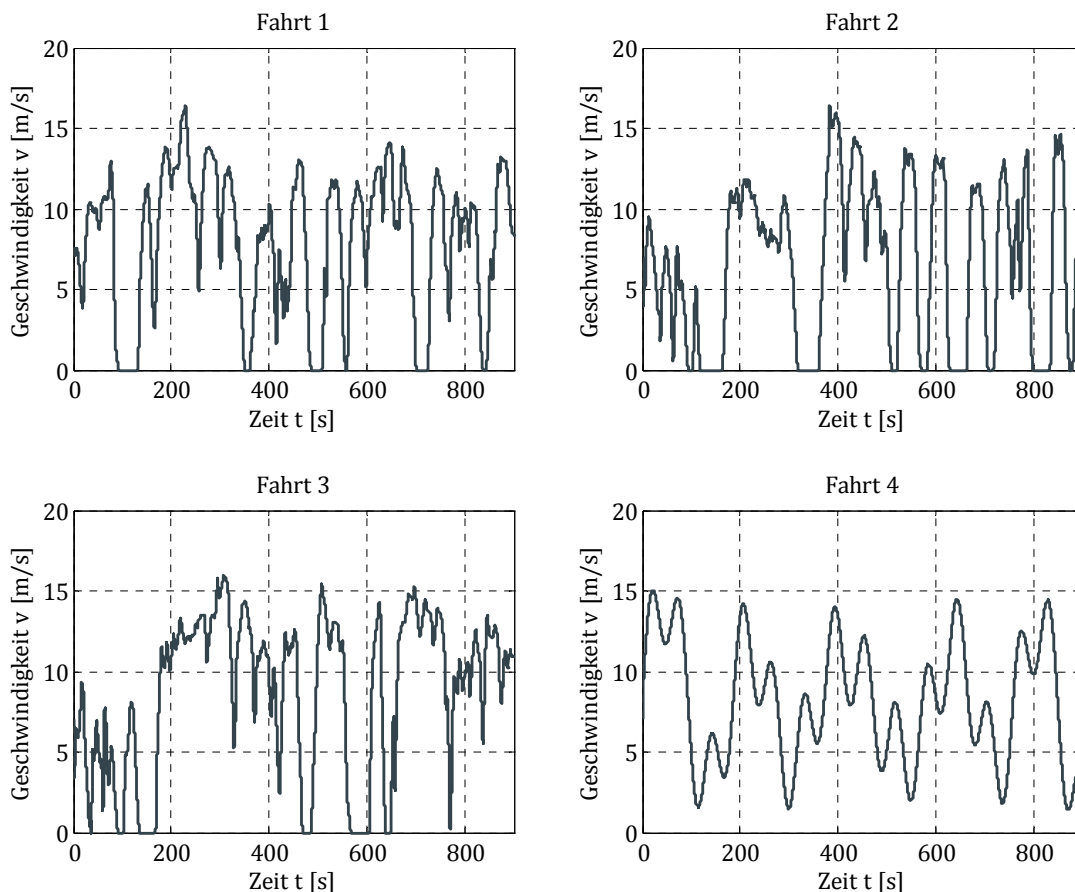


Abbildung 7-14: Geschwindigkeitsverläufe $v(t)$ der Messfahrten über der Zeit t

In den realen Geschwindigkeitsprofilen ist abschnittsweise stehender Verkehr vorhanden. In diesen Bereichen gilt für den Verkehrsfluss:

$$q = 0 \frac{Fzg}{t_{\text{Halt}}}. \quad \text{Gleichung 7-19}$$

Im Gegensatz zu einer Lichtsignalanlage ist diese Engstelle jedoch nicht eindeutig örtlich und oder zeitlich definiert. Aus der stehenden Fahrer-Fahrzeug-Einheit kann sich jedoch bei ausreichend großer Verkehrsnachfrage aufgrund der Anfahrverzögerung der Fahrer-Fahrzeug-Einheiten der sogenannte „Stau aus dem Nichts“ aufbauen, wobei sich der Stauanfang gegen die Fahrtrichtung bewegt. Dieses wird unter anderem in [TK10] hergeleitet.

In Tabelle 7-6 sind sowohl die Streckenlängen als auch die gefahrenen Durchschnittsgeschwindigkeiten sowie die räumlich-zeitlichen Straßenbelegungen für den Status Quo als auch für das nach Kapitel 5 ideale Fahrverhalten mit $\bar{v}_{ideal} = 100 \text{ km/h}$ über der gesamten Streckenlänge zusammengefasst. Diese werden im Folgenden mit den Parametern aus Abschnitt 5.1 berechnet.

Fahrt	Streckenlänge	\bar{v}_{SQ}	$F_{b,SQ}(\bar{v}_{SQ})$	$F_{b,ideal}(\bar{v}_{ideal})$
1	7214 m	8,02 m/s	37844 m ² s	26318 m ² s
2	5925 m	6,58 m/s	33978 m ² s	21618 m ² s
3	7782 m	8,65 m/s	39548 m ² s	28390 m ² s
4	7418 m	8,24 m/s	38456 m ² s	27062 m ² s

Tabelle 7-6: Streckenlängen, Durchschnittsgeschwindigkeiten des Status Quo \bar{v}_{SQ} und räumlich-zeitlich belegte Straßenflächen der vier Fahrten für den Status Quo $F_{b,SQ}(\bar{v}_{SQ})$ und das ideale Fahren $F_{b,ideal}(\bar{v}_{ideal})$

7.2.2 Systemauslegung und verwendete Modelle

Die agierende Fahrzeug-Längsführung wird analog zu dem Ampelphasenassistenzsystem in Abschnitt 7.1 durch die Anpassung des Modellparameters „Wunschgeschwindigkeit“ umgesetzt. Dies geschieht identisch zu dem Verhalten eines menschlichen Fahrers, welcher seine Geschwindigkeit antizipativ in Abhängigkeit aller erkannten vorausfahrenden Fahrer-Fahrzeug-Einheiten anpassen kann.

Dadurch ergibt sich ein Regelkreis für eine Fahrer-Fahrzeug-Einheit mit agierendem Stauassistenzsystem ohne Überwachung durch den Fahrer, der in der grundsätzlichen Struktur identisch zu dem Ampelphasenassistenzsystem ist. Die Eingangsgrößen aus der Umwelt enthalten nur Informationen bezüglich Abstand und Geschwindigkeit, allerdings von mehreren vorausfahrenden Fahrer-Fahrzeug-Einheiten. Daraus berechnet das Stauassistenzsystem die zu fahrende Geschwindigkeit als Führungsgröße für den Regler, das „Intelligent Driver Model“ berechnet anschließend die Beschleunigung.

Durch eine Vorausschau bzw. die Kenntnis der Geschwindigkeit mehrerer vorausfahrender Fahrer-Fahrzeug-Einheiten passt ein Stauassistenzsystem frühzeitig die Geschwindigkeit an und harmonisiert somit auch den Geschwindigkeitsverlauf der folgenden Fahrer-Fahrzeug-Einheiten. Dadurch wird die Geschwindigkeitsvolatilität reduziert und der Verkehrsfluss gesteigert.

Um diese notwendige Vorausschau zu ermöglichen, wird im Folgenden eine verbesserte Sensorik betrachtet. Diese kann die Geschwindigkeit mehrerer vorausfahrender Fahrer-Fahrzeug-Einheiten auch in einer größeren Entfernung detektieren. Dabei wird für die Simulation weder die Art des Sensors noch eine mögliche Fehldetektion berücksichtigt, es wird ein idealer Sensor angenommen.

Die Berechnung der Wunschgeschwindigkeit erfolgt für das Stauassistenzsystem durch

$$v_0 = \begin{cases} \min \left\{ v_0, \frac{1}{n_{Fzg}} \sum_{i=1}^{n_{Fzg}} v_i + v_{Offset} \right\}, & \text{wenn } n_{Fzg} > 0, \\ v_0, & \text{sonst.} \end{cases} \quad \text{Gleichung 7-20}$$

Dabei beschreibt n_{Fzg} die Anzahl aller detektierten, vorausfahrenden Fahrzeug-Einheiten und der Parameter v_i deren Geschwindigkeiten. Durch die Mittelwertbildung für die Wunschgeschwindigkeit kann sich der Abstand zu den vorausfahrenden Fahrer-Fahrzeug-Einheiten kontinuierlich verkleinern oder vergrößern. Im Falle einer Reduktion hält das „Intelligent Driver Model“ den Sicherheitsabstand ein und verhindert somit einen Auffahrunfall. Um eine stetige Vergrößerung des Abstandes zu vermeiden wird die Wunschgeschwindigkeit für den Fall von detektierten Fahrer-Fahrzeug-Einheiten um den Offset v_{Offset} erhöht. Dieser wird in diesem Beispiel mit

$$v_{Offset} = 7 \text{ km/h} \quad \text{Gleichung 7-21}$$

als Schrittgeschwindigkeit definiert. Um keine starre Kopplung zwischen einander folgenden Fahrer-Fahrzeug-Einheiten zu modellieren, werden für das Assistenzsystem in der Simulation die in Tabelle 7-7 zusammengefassten, beispielhaften Totzeiten angenommen.

Fahrmanöver	Totzeit
Anfahren aus dem Stillstand	0,8 s
Beschleunigung	0,3 s
Verzögerung	0,1 s

Tabelle 7-7: Totzeiten des vorausschauenden Stauassistenzsystems

7.2.3 Simulationsbetrachtung

Analog zu dem Ampelphasenassistenzsystem wird für die Simulationsbetrachtung das in Kapitel 6 entworfene Simulationswerkzeug verwendet. Für die Simulation des vorausschauenden Stauassistenzsystems wird eine Kolonne aus zehn Fahrer-Fahrzeug-Einheiten modelliert, der ersten Einheit werden die in Abbildung 7-14 gezeigten Geschwindigkeitsprofile als Geschwindigkeiten vorgegeben, vergleiche Anhang C. Dieser ersten Fahrer-Fahrzeug-Einheit folgen drei weitere, welche nicht mit dem Stauassistenzsystem ausgestattet sind. Dadurch wird gewährleistet, dass für die folgenden Fahrzeuge mit Assistenzsystem immer vorausfah-

rende Fahrer-Fahrzeug-Einheiten (FFE) für die Geschwindigkeitsdetektion vorhanden sind. Die fünfte Fahrer-Fahrzeug-Einheit ist immer mit dem vorausschauenden Stauassistenzsystem ausgestattet. Es folgen noch fünf weitere Fahrzeuge, in verschiedenen Simulationsläufen werden diese auch mit dem Assistenzsystem ausgestattet. Die zehnte Fahrer-Fahrzeug-Einheit wird dafür verwendet, die Auswirkungen auf den Verkehr zu bestimmen. Für alle nicht ausgestatteten Fahrer-Fahrzeug-Einheiten wird das in SUMO implementierte Verhaltensmodell verwendet.

Das Simulationsszenario entspricht einem einfachen, langen und geraden Streckenabschnitt. Für die Abschätzung der verkehrlichen Wirkung ist das ausreichend, da alle infrastrukturseitigen Einschränkungen des Verkehrsnetzes bereits durch das reale Geschwindigkeitsprofil enthalten sind.

Zu Beginn der Simulation fährt die erste Fahrer-Fahrzeug-Einheit 200 Sekunden lang mit 25 km/h. Dadurch bildet sich eine eingeschwungene Kolonne aller Fahrer-Fahrzeug-Einheiten des Simulationsszenarios, deren Abstand ist nur noch von der gewählten Zeitlücke abhängig. Nach diesem Zeitabschnitt fährt die erste Fahrer-Fahrzeug-Einheit das vorgegebene Geschwindigkeitsprofil.

Tabelle 7-8 zeigt die Parametervariationen, welche im Rahmen der Simulation durchgeführt werden. Es werden alle möglichen Kombinationen simuliert. Weiterhin wird als Referenz eine Status Quo-Fahrt ohne ausgestattete Fahrer-Fahrzeug-Einheiten simuliert. Der Parameter $A_{VAS,V}$ enthält die Nummern der Fahrer-Fahrzeug-Einheiten, die mit dem System ausgestattet sind. Diese Nummerierung ist in Abbildung 7-15 skizziert.

Parameter	Werte
maximale Beschleunigung a	$1 \text{ m/s}^2; 2 \text{ m/s}^2$
komfortable Bremsverzögerung b	$2 \text{ m/s}^2; 3 \text{ m/s}^2$
Zeitlücke T	$1 \text{ s}; 2 \text{ s}$
Sensorreichweite r_s	$100 \text{ m}; 200 \text{ m}; 300 \text{ m}$
maximale Anzahl erkannter FFE $n_{max,Fzg}$	$1; 2; 3; 4; 5$
Ausstattungsvektor $A_{VAS,V}$	$1 = (5), 2 = \begin{pmatrix} 5 \\ 7 \end{pmatrix}, 3 = \begin{pmatrix} 5 \\ 7 \\ 9 \end{pmatrix}, 4 = \begin{pmatrix} 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \end{pmatrix}$

Tabelle 7-8: Variierte Parameter der Simulation



Abbildung 7-15: Nummerierung der Fahrer-Fahrzeug-Einheiten

7.2.4 Bewertung der verkehrlichen Auswirkungen

Um die verkehrlichen Auswirkungen des vorausschauenden Stauassistenzsystems in dem obigen Verkehrsszenario bewerten zu können, wird zunächst die räumlich-zeitlich belegte Straßenfläche berechnet. Abbildung 7-16 zeigt diese in den vier Fahrten in Abhängigkeit des Ausstattungsvektors für die zehnte Fahrer-Fahrzeug-Einheit. Für alle Abbildungen wird der Parametersatz verwendet, welcher die stärkste verkehrliche Wirkung erwarten lässt. Dieser ist gegeben durch $a = 2 \text{ m/s}^2$, $b = 3 \text{ m/s}^2$, $T = 2 \text{ s}$, $r_s = 300 \text{ m}$, $n_{\max, \text{Fzg}} = 5$.

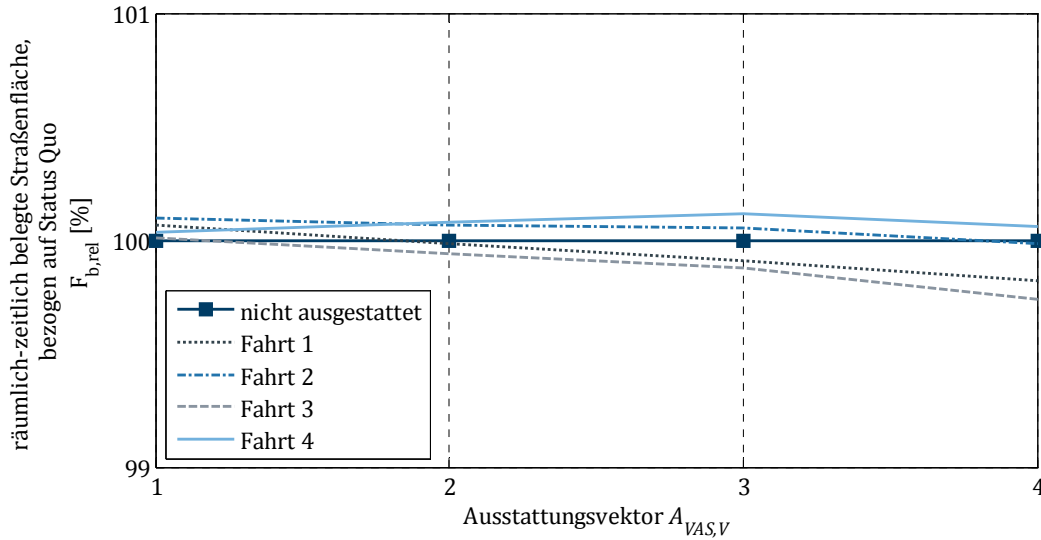


Abbildung 7-16: Relative räumlich-zeitlich belegte Straßenfläche $F_{b,rel}$ der Fahrer-Fahrzeug-Einheit 10 in Abhängigkeit des Ausstattungsvektors $A_{VAS,V}$

Es wird ersichtlich, dass die räumlich-zeitlich belegte Straßenfläche, wie bereits in der Einleitung des Beispiels formuliert, durch das Stauassistenzsystem nicht reduziert werden kann. Die Ursache hierfür ist die mit festem Geschwindigkeitsprofil fahrende, nicht überholbare erste Fahrer-Fahrzeug-Einheit. Dadurch wirkt sie wie ein Blocker für alle folgenden Fahrer-Fahrzeug-Einheiten, diese können ihre Durchschnittsgeschwindigkeit nicht steigern. Daraus folgt, dass die verkehrliche Effizienz nach der Definition in Abschnitt 5.3 nicht erhöht werden kann:

$$Q_{\text{Status-Quo}}(\bar{v}_{opt}, \bar{v}_{SQ}) = \frac{F_{b,opt}(\bar{v}_{opt})}{F_{b,SQ}(\bar{v}_{SQ})} \approx 1. \quad \text{Gleichung 7-22}$$

Dementsprechend ergibt die Abschätzung der Auswirkungen auf den Verkehr nach Kapitel 0 aufgrund der nahezu konstanten Durchschnittsgeschwindigkeit für den mittleren Verkehrsfluss

$$Q_m = \frac{q_{m,opt}}{q_{m,SQ}} \approx 1 \quad \text{Gleichung 7-23}$$

und für die mittlere Verkehrsdichte

$$P_m = \frac{\rho_{m,opt}}{\rho_{m,SQ}} \approx 1. \quad \text{Gleichung 7-24}$$

Dies bedeutet, dass der mittlere Verkehrsfluss durch das vorausschauende Stauassistenzsystem in der betrachteten Auslegung und dem untersuchten Simulationsszenario nicht gesteigert wird.

Jedoch könnte voraussichtlich eine Reduktion der räumlich-zeitlichen Straßenbelegung bzw. eine Steigerung des mittleren Verkehrsflusses nachgewiesen werden, wenn auch der Stauentstehungsprozess mitsimuliert wird.

Die Harmonisierung der Geschwindigkeiten kann entsprechend Kapitel 3 Staus vermeiden und ist damit eine der wesentlichen Wirkungsmöglichkeiten von verkehrsoptimierenden Assistenzsystemen zur langfristigen Steigerung des Verkehrsflusses. Durch die Reduktion der Geschwindigkeitsvolatilität wird die Ausbreitung von Stauwellen reduziert und somit die Stauauflösung begünstigt.

Um diese Harmonisierung und dadurch auch einen Nutzen des Verkehrshilfssystems nachzuweisen, wird im Folgenden das Geschwindigkeitsprofil der letzten Fahrer-Fahrzeug-Einheit betrachtet. In Abbildung 7-17 ist dies sowohl für die Referenzfahrt, in der alle Fahrer-Fahrzeug-Einheiten ohne Assistenzsystem fahren, als auch für den zweiten und vierten Ausstattungsvektor A_{VAS} beispielhaft für Fahrt 1 abgebildet. Abbildung 7-18 zeigt die analoge Darstellung für Fahrt 4. Es wird deutlich, dass die Geschwindigkeitsvolatilität mit höheren Ausstattungsraten deutlich sinkt.

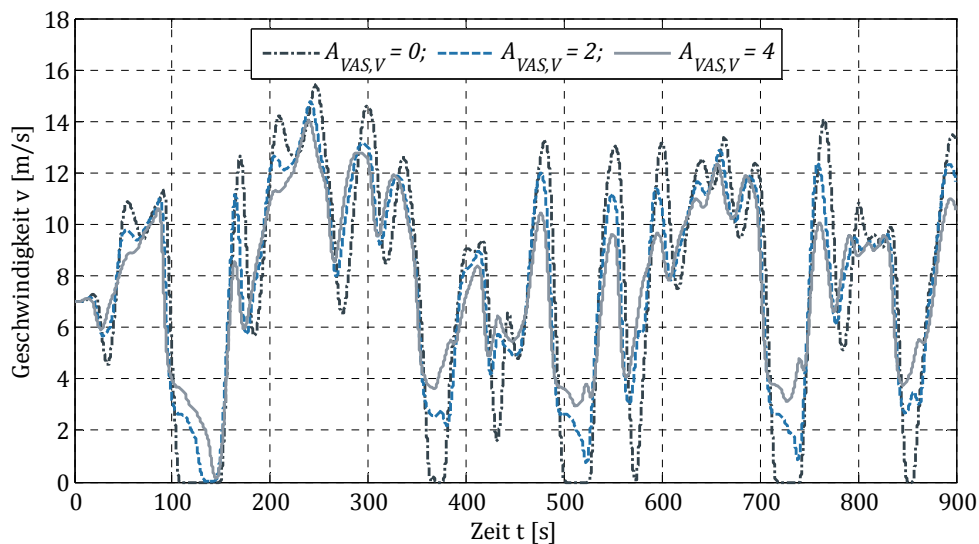


Abbildung 7-17: Geschwindigkeitsverlauf $v(t)$ der Fahrer-Fahrzeug-Einheit 10 in der ersten Fahrt über der Zeit t in Abhängigkeit des Ausstattungsvektors $A_{VAS,V}$

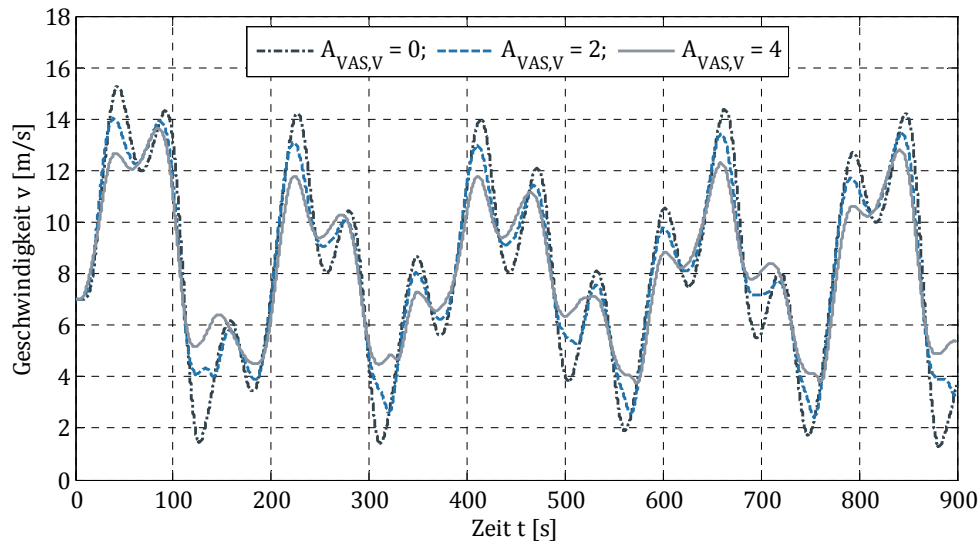


Abbildung 7-18: Geschwindigkeitsverlauf $v(t)$ der Fahrer-Fahrzeug-Einheit 10 in der vierten Fahrt über der Zeit t in Abhängigkeit des Ausstattungsvektors $A_{VAS,V}$

Bei der ersten Fahrt wird ersichtlich, dass mit größerem Ausstattungsvektor $A_{VAS,V}$ Halte verhindert werden können und somit der Verkehrsfluss aufrechterhalten wird. Dies zeigt Abbildung 7-19, der Verkehrsfluss wurde entsprechend Gleichung 5-28 berechnet. Dabei wird die Geschwindigkeit der Fahrer-Fahrzeug-Einheit 10 als lokale Geschwindigkeit angenommen und die in der Simulationsuntersuchung verwendeten Parametern genutzt.

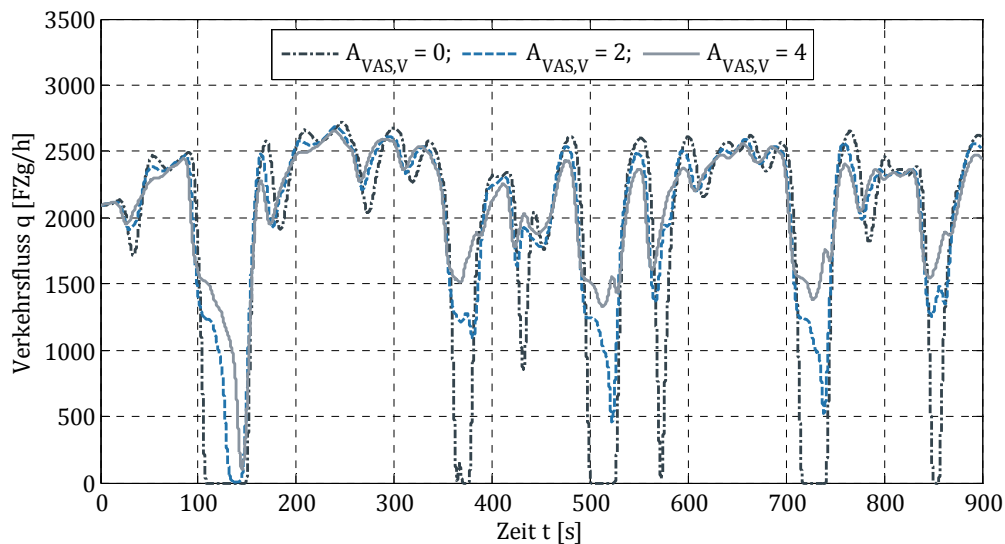


Abbildung 7-19: Verkehrsfluss q in Fahrt 1 über der Zeit t in Abhängigkeit des Ausstattungsvektors $A_{VAS,V}$, basierend auf der von Fahrer-Fahrzeug-Einheit 10 gefahrenen Geschwindigkeit

Durch die vorausschauende Fahrweise des Assistenzsystems kann in den Zeitpunkten von $t = 375 \text{ s}$ und $t = 725 \text{ s}$ der Verkehrsfluss von 0 Fzg/h auf ca. 1500 Fzg/h beziehungsweise auf ca. $0,4 \text{ Fzg/sec}$ gesteigert werden. Durch die Vermeidung von Anfahrsverzögerungen stehender Fahrer-Fahrzeug-Einheiten kann damit die Entstehung eines „Staus aus dem Nichts“ verhindert werden.

Im Gegensatz zu der Auswertung bezogen auf die ganze Fahrt ergibt sich bei der lokalen Betrachtung eine nennenswerte Reduktion der räumlich-zeitlich belegten Straßenfläche. Dies resultiert aus der Vermeidung des Haltes, da während eines Haltes

$$\lim_{\bar{v} \rightarrow 0} F_b(\bar{v}) = \infty \quad \text{Gleichung 7-25}$$

gilt (vergleiche Abschnitt 5.1). Die sich aus der konkreten Betrachtung der oben genannten exemplarischen Zeiträume ergebende räumlich-zeitlich belegte Straßenfläche ist in Tabelle 7-9 zusammengefasst. Dabei wird diese für eine quasi-lokale gefahrene Strecke von 50 m ab dem Startzeitpunkt berechnet. Es zeigt sich eine signifikante Reduktion der räumlich-zeitlich belegten Straßenfläche von 39% in der ersten und von 48% in der vierten Fahrt.

Abschnitt	Startzeitpunkt	\bar{v}	$F_b(\bar{v}), A_{VAS,V} = 0$	$F_b(\bar{v}), A_{VAS,V} = 4$
1	365 s	1,95 m/s	815 m ² s	498 m ² s
2	718 s	1,42 m/s	1045 m ² s	544 m ² s

Tabelle 7-9: Durchschnittsgeschwindigkeiten \bar{v} und quasi-lokale räumlich-zeitlich belegte Straßenflächen $F_b(\bar{v})$ der Fahrer-Fahrzeug-Einheit 10 während der ersten Fahrt in Abhängigkeit des Ausstattungsvektors $A_{VAS,V}$

Als Maß für die Harmonisierung des Geschwindigkeitsprofils und auch als Indiz für den Kraftstoffverbrauch wird analog zu der Bewertung des Ampelassistenzsystems das Integral aller positiven Beschleunigungen über der Zeit gebildet. Abbildung 7-20 zeigt diese Kenngröße prozentual bezogen auf die Status Quo-Fahrt für alle vier Messfahrten. Hier bestätigt sich die zunehmende Reduktion der Geschwindigkeitsvolatilität über der Ausstattungsrate, die positiven Beschleunigungen können um bis zu 46% reduziert werden. Als logische Folge daraus wird auch der Kraftstoffverbrauch der einzelnen Fahrer-Fahrzeug-Einheiten reduziert.

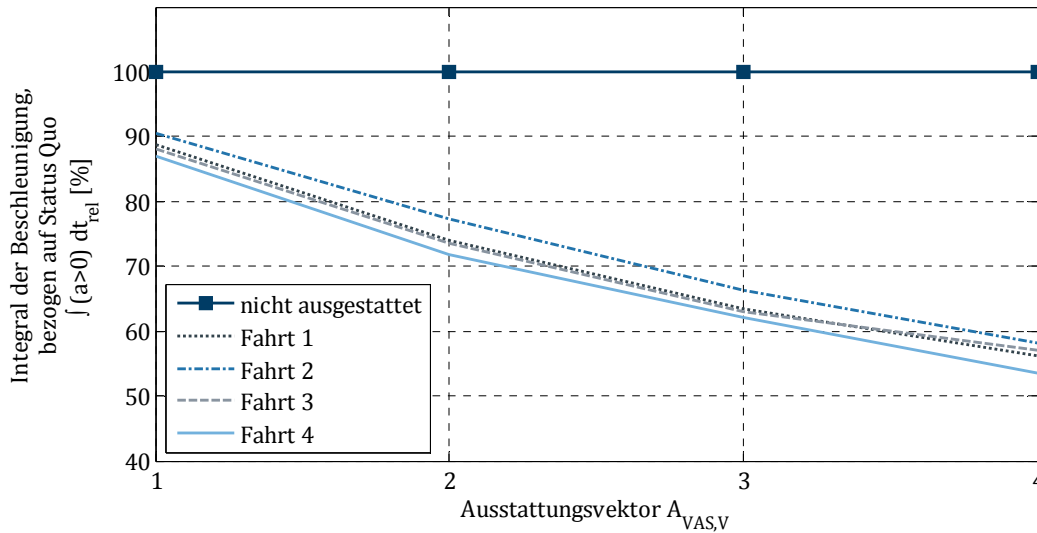


Abbildung 7-20: Relatives Integral der positiven Beschleunigungen $\int(a > 0)dt_{rel}$ über der Zeit t für die Fahrer-Fahrzeug-Einheit 10 in Abhängigkeit des Ausstattungsvektors $A_{VAS,V}$

Zusammenfassend wurde, der Erwartung entsprechend, die räumlich-zeitlich belegte Straßenfläche durch das Stauassistenzsystem nicht reduziert. Da die Durchschnittsgeschwindigkeit konstant bleibt und sich die Geschwindigkeitsvolatilität verringert, wird der Verkehrsfluss aber harmonisiert. Dies zeigt sich insbesondere in der Vermeidung von Halten und damit der Aufrechterhaltung des Verkehrsflusses. Der individuelle Vorteil des reduzierten Kraftstoffverbrauches wird daher in Kombination mit einer positiven verkehrlichen Auswirkung gewonnen.

Ein Vergleich mit den Ergebnissen des Förderprojektes „Invent“ [INV06b] zeigt, dass beide Untersuchungen ähnliche Ergebnisse hinsichtlich der Harmonisierung des Geschwindigkeitsverlaufes und der Reduktion des Kraftstoffverbrauches erzielen. Ein Ergebnisvergleich bezüglich des Verkehrsflusses ist aufgrund des hier verwendeten Simulationsszenarios nicht möglich.

7.3 Diskussion

Dieses Kapitel hat die zielgerichtete Nutzbarkeit der in der vorliegenden Arbeit hergeleiteten Methoden und Werkzeuge bestätigt. Dies sind sowohl das Konzept zur Kopplung von Verkehrsassistenzsystem- mit mikroskopischen Verkehrsflussmodellen, die Kenngröße der räumlich-zeitlichen belegten Straßenfläche als auch das aus Matlab / Simulink und SUMO bestehende, gekoppelte Simulationswerkzeug.

Weiterhin haben beide Simulationsbeispiele gezeigt, dass der Verkehr durch entsprechende Verkehrsassistenzsysteme harmonisiert werden kann. Dabei bietet die räumlich-zeitlich belegte Straßenfläche im Gegensatz zu existierenden Verkehrskenngrößen eine zusätzliche Aussagekraft über die verkehrliche Effizienz einer Fahrer-Fahrzeug-Einheit. Neben einer Optimie-

rung des Verkehrs resultieren aus den Assistenzsystemen auch individuelle Vorteile wie zum Beispiel ein reduzierter Kraftstoffverbrauch.

Die ermittelten Simulationsergebnisse erscheinen nachvollziehbar und zeigen ein enormes Potenzial zum Beispiel hinsichtlich der Anzahl an vermeidbaren Stopps oder auch der reduzierten Beschleunigungen. Jedoch wurden für die Untersuchungen einige Vereinfachungen angenommen. Für das Ampelassistenzsystem waren dies ein immer exakt bekannter Rückstau sowie konstante Anfahrverzögerungen aller wartenden Fahrer-Fahrzeug-Einheiten. Bei dem Stauassistenzsystem wurde ein perfekter Sensor angenommen, welcher zu jeder Zeit die exakte Geschwindigkeit aller Fahrzeuge in der Sensorreichweite bestimmen kann. Weiterhin wurde pro Verkehrsassistenzsystem nur ein Szenario untersucht.

Daher sollten in weiteren Simulationsuntersuchungen diese Vereinfachungen realistischer modelliert werden, so dass zum Beispiel der Rückstau beim Ampelassistenzsystem oder die Geschwindigkeit beim Stauassistenzsystem über- oder unterschätzt wird. Darüber hinaus sollten weitere Szenarien insbesondere mit mehreren Fahrstreifen und damit auch unter Berücksichtigung möglicher Überholmanöver betrachtet werden.

Die Bewertung des Ampelassistenzsystems zeigt, dass die räumlich-zeitliche Straßenfläche erst nach dem Überfahren der Haltelinie aufgrund der gestiegenen Durchschnittsgeschwindigkeit signifikant reduziert werden kann. Daraus folgt logischerweise, dass das Assistenzsystem hinsichtlich einer höheren Geschwindigkeit ab der Haltelinie optimiert werden muss. Somit scheint es aus verkehrlicher Sicht sinnvoll, vor der Haltelinie noch langsamer zu fahren. Ziel dabei ist es, bereits beim Überfahren der Haltelinie die maximal erlaubte Geschwindigkeit zu fahren und somit die räumlich-zeitlich belegte Straßenfläche weiter zu reduzieren.

Für das Ampelassistenzsystem bietet sich zusätzlich die Untersuchung einer optimierten Schaltung von Lichtsignalanlagen analog des Projektes „KOLINE“ an. Dabei können die Position und Geschwindigkeit der Fahrer-Fahrzeug-Einheiten, welche der Lichtsignalanlage aufgrund der existierenden Kommunikation bekannt sind, für die Optimierung verwendet werden. Mit Hilfe des Simulationswerkzeugs kann die Steuerung der Lichtsignalanlage in Matlab / Simulink modelliert und die Schaltzeiten mit Hilfe des Traffic-Control-Interfaces an SUMO übermittelt werden. Aufgrund der dadurch gegebenen Auswirkungen auf das gesamte Verkehrsnetz lässt sich eine höhere, großflächige Steigerung des Verkehrsflusses erwarten.

Bei dem Stauassistenzsystem erscheint weiterhin die Simulation der Stauentstehung sinnvoll, um eine mögliche stauvermeidende Wirkung des Systems auch in der Simulation nachzuweisen.

Zusammenfassend zeigen beide Beispiele eindeutig das Potenzial der Nutzung der fahrtaktischen Möglichkeiten zur Optimierung des Verkehrs durch Verkehrsassistenzsysteme. Somit kann eine Optimierung neben der Netz- und Trassenebene auch auf Fahrzeugebene erfolgen.

8 Zusammenfassung und weiterer Forschungsbedarf

In der vorliegenden Arbeit wurde, basierend auf der Verknüpfung der Wissenschaftsbereiche Verkehrsdynamik und Fahrerassistenz, ein Konzept für die systematische Kopplung von Verkehrsassistenzsystemmodellen mit dem mikroskopischen Verhaltensmodell einer Fahrer-Fahrzeug-Einheit erarbeitet. Um Verkehrsassistenzsysteme auf Grundlage der verkehrlichen Effizienz auslegen und bewerten zu können, wurde eine neue Kenngröße hergeleitet. Darüber hinaus wurde ein Simulationswerkzeug zur Umsetzung der Modellkopplung und damit für die systematische Untersuchung von Verkehrsassistenzsystemen im Verkehrsfluss entwickelt.

Für die Kopplung von Verkehrsassistenzsystemmodellen mit dem mikroskopischen Verhaltensmodell wurde zunächst der Regelkreis Fahrer-Fahrzeug um das Assistenzsystem erweitert. Dabei ist im Sinne eines generischen Konzeptes sowohl die Modellkopplung für informierende als auch agierende Systeme ausgearbeitet worden. Bei einem agierenden Assistenzsystem wird weiterhin unterschieden, ob der Fahrer das System überwacht oder Nebentätigkeiten ausübt. Die so hergeleiteten Regelkreise wurden auf das in mikroskopischen Verkehrsflusssimulationen verwendete Verhaltensmodell übertragen. Dadurch wurde ein Verhaltensmodell mit Berücksichtigung von Assistenzsystemen hergeleitet, welches in einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation zur systematischen Untersuchung von Verkehrsassistenzsystemen verwendet werden kann.

Um Verkehrsassistenzsysteme zielgerichtet für die Steigerung des Verkehrsflusses auslegen zu können, wurde die räumlich-zeitlich belegte Straßenfläche einer Fahrer-Fahrzeug-Einheit als Bewertungskenngröße hergeleitet und analysiert. Bezogen auf die zur Verfügung stehende räumlich-zeitliche Straßenfläche eines definierten Streckenabschnitts lässt sich damit die verkehrliche Effizienz des Verkehrsassistenzsystems bewerten. Darauf aufbauend können sowohl die Auswirkungen eines Assistenzsystems auf die etablierten makroskopischen Verkehrskenngrößen bestimmt als auch Einsatzgebiete für Verkehrsassistenzsysteme identifiziert werden.

Für die Bestimmung der Auswirkungen von Verkehrsassistenzsystemen auf den Verkehr ist aus den beschriebenen Gründen eine Simulation notwendig. Das hierfür im Rahmen der Arbeit entwickelte Simulationswerkzeug ermöglicht die zielgerichtete Kombination von Verhaltensmodellen menschlicher Fahrer mit Assistenzsystemmodellen unterschiedlicher Assistenzstrategien und Assistenzebenen. Darüber hinaus können mit diesem Werkzeug auch infrastrukturseitige Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen untersucht und mit der Wirkung von Verkehrsassistenzsystemen verglichen werden. Ebenso ermöglicht das Werkzeug mit der Untersuchung kooperativer Systeme die kombinierte Entwicklung von fahrzeug- und infrastrukturseitigen Maßnahmen.

Abschließend wurden sowohl das Konzept der Modellkopplung als auch die Kenngröße der räumlich-zeitlich belegten Straßenfläche sowie das Simulationswerkzeug in zwei Beispielen angewendet. Das untersuchte Ampelphasenassistenzsystem hat genau wie das betrachtete Stauassistenzsystem die mögliche Verbesserung des Verkehrs durch Assistenzsysteme bestä-

tigt. Beide Beispiele weisen ein hohes verkehrliches Potenzial auf. Das Ampelphasenassistenzsystem kann die räumlich-zeitliche belegte Straßenfläche um fast 5 % reduzieren und in einer Abschätzung der verkehrlichen Wirkung den Verkehrsfluss um mehr als 5 % steigern. Die Anzahl der Halte kann um bis zu 75 % und das Integral der positiven Beschleunigung als Maß für den Kraftstoffverbrauch um bis zu 41 % gesenkt werden. Die Validierung in der Praxis zeigt eine sehr gute Übereinstimmung von simulierten und realen Geschwindigkeitsverläufen und lässt damit eine Übertragung der Ergebnisse auf die Realität erwarten. Das vorausschauende Stauassistenzsystem kann die verkehrliche Effizienz und den Verkehrsfluss zwar nicht steigern, da die Stauentstehung nicht simuliert wird. Zusätzlich wirkt die erste Fahrer-Fahrzeug-Einheit wie ein Blocker analog einer roten Lichtsignalanlage. In einer lokalen Betrachtung kann der Verkehrsfluss jedoch von 0 Fzg/h auf bis zu 1500 Fzg/h gesteigert werden, da Halte vermieden werden. Durch eine Harmonisierung des Geschwindigkeitsprofils kann das Integral der positiven Beschleunigung um bis zu 46 % verringert werden. Diese verkehrlichen Wirkungen wurden durch den Vergleich mit einer Status Quo-Simulation, also ohne Modellkopplung und damit ohne Verkehrsassistenzsystem, bestimmt.

Bei der Ergebnisbewertung ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Simulationen in vereinfachten Szenarien mit perfekten Eingangsdaten durchgeführt wurden. Es wurden beispielsweise keine mehrstreifigen Straßen untersucht und die Geschwindigkeiten anderer Fahrer-Fahrzeug-Einheiten wurden durch das Verkehrsassistenzsystem immer korrekt gemessen. Daher können die obigen Ergebnisse als maximale Abschätzung der verkehrlichen Wirkung verstanden werden, die in der Realität erzielbaren Auswirkungen werden geringer ausfallen. Darüber hinaus erfolgte die Auslegung der Verkehrsassistenzsysteme nur prototypisch und unter dem Aspekt der verkehrlichen Effizienz. Damit zusammenhängende Fragen bezüglich der Fahrzeugemissionen und der Verkehrssicherheit wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet. Weiterhin wurden auch die möglichen Ursachen von Verkehrsproblemen nicht untersucht, sondern von deren Existenz ausgegangen.

Basierend auf den Erkenntnissen der vorliegenden Arbeit können die im Abschnitt 1.3 formulierten Forschungsfragen beantwortet werden:

Forschungsfrage 1:

Welche Ausprägungen muss ein Verkehrsassistenzsystem zur Steigerung des Verkehrsflusses haben und in welchen Bereichen des Fundamentaldiagramms des Verkehrs ist eine Optimierung möglich?

Basierend auf der theoretischen Herleitung in Kapitel 3 können alle auf der Bahnführungs- oder Navigationsebene agierenden und informierenden Verkehrsassistenzsysteme Auswirkungen auf die Verkehrskenngrößen haben. Die Systeme sollten dabei möglichst eine Vorausschau besitzen, um über einen größeren Wissenshorizont zu verfügen und darauf aufbauend verkehrsadaptive Fahrstrategien berechnen zu können. Darüber hinaus zeigen die Beispiele aber auch, dass die Beeinflussung des Verkehrs bereits durch einfache Manöver wie frühzeitiges Bremsen oder das Fahren mit einem harmonisierten Geschwindigkeitsprofil möglich ist. Durch die gesunkene Volatilität der Geschwindigkeit kann der Verkehrsfluss gesteigert werden. Verkehrsassistenzsysteme sollten in Folge dessen immer dann eingesetzt werden, wenn die verkehrliche Effizienz des Status Quo geringer ist als die des optimierten Fah-

rens und sobald sich der Verkehr am Übergang in den instabilen Bereich beziehungsweise in diesem befindet.

Forschungsfrage 2:

Wie können die Auswirkungen von Verkehrsassistenzsystemen bestimmt und wie kann die verkehrliche Effizienz des individuellen Fahrens bewertet werden?

Für die systematische Bestimmung der Auswirkungen auf den Verkehr ist eine Simulation der Verkehrsassistenzsysteme notwendig. Der um Verkehrsassistenzsysteme erweiterte Regelkreis Fahrer-Fahrzeug ermöglicht die systematische Untersuchung aller Ausprägungen von Assistenzsystemen. Die Effizienzbewertung des individuellen Fahrens kann basierend auf der zur Verfügung stehenden Straßenfläche durchgeführt werden, da sie das begrenzende Maß für den Verkehrsfluss ist. Auf Basis der räumlich-zeitlich belegten Straßenfläche kann sowohl das individuelle Fahren bewertet als auch die Auswirkungen auf den Verkehr abgeschätzt werden. Durch den Vergleich mit dem Status Quo kann das verkehrliche Potenzial bestimmt werden. Basierend auf dem Ziel der verkehrlichen Optimierung ist die räumlich-zeitlich belegte Straßenfläche zu minimieren.

Aus den Erkenntnissen der vorliegenden Arbeit lässt sich außerdem weiterer Forschungsbedarf ableiten:

Um menschliche Fahrer in der Simulation zielgerichtet untersuchen zu können, sind die existierenden Modelle weiterzuentwickeln. Auch sollten für realistische Simulationen Untersuchungen hinsichtlich der Befolgungsrate und der Befolgungsgenauigkeit durchgeführt werden. Dies gilt analog für die zu definierenden Parametersätze im Rahmen der vom Fahrer akzeptierten minimalen und maximalen Regelgrößen, welche zu ermitteln sind.

Im Rahmen der Herleitung der räumlich-zeitlich belegten Straßenfläche wurde die Straßenbelegung in Fahrzeug-Querrichtung zwar eingeführt, dann aber als Konstante betrachtet. Allerdings ist der Verkehr nicht in allen Ländern der Welt fahstreifengebunden, weshalb eine Untersuchung der möglichen Effizienzsteigerung in Querrichtung sinnvoll ist. Weiterhin wurde für die Reduzierung der belegten Straßenfläche eine einfache Parametervariation durchgeführt. Eine automatisierte Optimierung basierend auf entsprechenden Algorithmen kann die Auslegung von Verkehrsassistenzsystemen deutlich vereinfachen und beschleunigen.

Für eine vereinfachte Anwendung des gekoppelten Simulationswerkzeugs ist die Berechnung der Führungsgrößen, die bisher manuell ermittelt werden, durch SUMO und deren Integration in das Traffic-Control-Interface hilfreich.

Bezüglich der Anwendungsbeispiele besteht weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich der Akzeptanz des Fahrers für eine verkehrlich optimierte Fahrweise. Unter anderem ist zu hinterfragen, in wie weit sich ein Fahrer das Fahrverhalten durch ein Assistenzsystem vorschreiben lässt. Insbesondere ist, bezogen auf die Beispiele, das Verhalten eines Fahrers bei der Annäherung an eine rote Lichtsignalanlage und das Vertrauen in ein solches Ampelphasenassistenzsystem interessant. Dabei ist betrachtenswert, wie ein menschlicher Fahrer sein Fahrverhalten auch ohne ein Verkehrsassistenzsystem anpasst, wenn er eine analoge Vorausschau besitzt.

In weiteren Simulationsuntersuchungen sollten die angenommenen Vereinfachungen der Anwendungsbeispiele realistischer modelliert werden, so dass zum Beispiel der Rückstau bei dem Ampelassistentensystem oder die Geschwindigkeiten bei dem vorausschauenden Stauassistentensystem über- oder unterschätzt wird. Darüber hinaus sollten weitere Szenarien insbesondere mit mehreren Fahrstreifen und damit auch unter Berücksichtigung möglicher Überholmanöver betrachtet werden. Bei dem Stauassistentensystem ist insbesondere die Stauentstehung zu betrachten. Auch können die Algorithmen der Systeme optimiert werden, so dass zum Beispiel das Stauassistentensystem zusätzlich die Abstände zu den vorausfahrenden Fahrer-Fahrzeug-Einheiten berücksichtigt und nicht nur ein pauschaler Geschwindigkeitsoffset verwendet wird.

Des Weiteren ist der Vergleich von fahrzeugseitiger und infrastrukturseitiger Verkehrsbeeinflussung bezüglich des Verkehrsflusses und der räumlich-zeitlich belegten Straßenfläche für eine abschließende Bewertung von Verkehrsassistenzsystemen notwendig. Darüber hinaus sind weiterführende Untersuchungen hinsichtlich der Auswirkungen von Verkehrsassistenzsystemen auf die Verkehrssicherheit und den Kraftstoffverbrauch durchzuführen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass mit dieser Arbeit ein wesentlicher Beitrag für die zielgerichtete und systematische Nutzung des Potenzials von Verkehrsassistenzsystemen zur Steigerung des Verkehrsflusses geleistet wurde. Es wurde nachgewiesen, dass diese Systeme den Verkehr zusätzlich zur Netz- und Trassenebene auch auf der Fahrzeugebene optimieren können. In Hinblick auf die weiter zunehmenden Verkehrsprobleme sollte dieses große Potenzial genutzt werden.

Aufgrund der zunehmenden Automatisierung in Fahrzeugen durch Assistenzsysteme sowie deren Vernetzung kann davon ausgegangen werden, dass diese in Zukunft einen immer größeren Beitrag zur Verkehrsqualität und Verkehrseffizienz leisten können und werden [ROO15] [WIS15] [VDA14]. Darauf aufbauend kann der im Rahmen dieser Arbeit noch auftretende Zielkonflikt zwischen energieoptimalem und verkehrsoptimalem Fahren insbesondere durch das Automatische Fahren reduziert werden. Dies ist unter anderem durch die Vermeidung der menschlichen Unzulänglichkeiten wie Schätzfehler, Reaktionszeiten oder fehlerhafter Fahrzeugführung möglich. Ein harmonisiertes Fahrverhalten ohne unnötige Beschleunigungs- oder Verzögerungsmanöver steigert sowohl den individuellen Komfort als auch entsprechend der Herleitungen in dieser Arbeit die Verkehrseffizienz, analog dazu wird die Energieeffizienz optimiert.

9 Literatur

- [ABE07] Abel, Dirk: *Mess- und Regelungstechnik und Ergänzungen (Höhere Regelungstechnik) – Umdruck zur Vorlesung, 31. Auflage*, Institut für Regelungstechnik, Aachen, 2007
- [ADA15] ADAC (Hrsg.): *Staubilanz 2014*, https://www.adac.de/_mmm/pdf/statistik_staubilanz_0215_231552.pdf, Abruf: 21.04.2015
- [ADA11] ADAC (Hrsg.): *Auf dem Seitenstreifen flexibel gegen den Stau – Erhöhung der Verkehrskapazität*, In: ADAC Staumeldermagazin Juni 2011, Seite 7, München, 2011
- [AHR10] Ahrens, Gerd-Axel: *Anforderungen an Verkehrsinfrastrukturplanung unter den Aspekten Klimaschutz und Energieeffizienz*, In: dena-Energieeffizienzkongress 2010, Berlin, 2010
- [AIM14a] AIM: *Anwendungsplattform Intelligente Mobilität Braunschweig*, http://www.dlr.de/ts/en/desktopdefault.aspx/tabid-6422/10597_read-37397/, Abruf: 17.04.2014
- [AIM14b] AIM: *Anwendungsplattform Intelligente Mobilität Braunschweig*, http://www.dlr.de/fs/Portaldata/16/Resources/dokumente/service/DLR-TS_AnwendungsplattformIntelligenteMobilitaet.pdf, Abruf: 17.04.2014
- [AKT15a] Aktiv – Adaptive und kooperative Technologien für den intelligenten Verkehr: *Aktiv – gemeinsam die Zukunft Erfahren, Projektübersicht*, http://www.vwi.tu-dresden/~treiber/download_general/aktiv_image_deutsch.pdf, Abruf: 20.04.2015
- [AKT15b] Aktiv – Adaptive und kooperative Technologien für den intelligenten Verkehr: *Projekte*, <http://www.aktiv-online.org/deutsch/projekte.html>, Abruf: 20.04.2015
- [AKT15c] Aktiv – Adaptive und kooperative Technologien für den intelligenten Verkehr: *Ergebnisse*, http://www.aktiv-online.org/deutsch/Downloads/Broschueren/Ergebnisbuch_aktiv_gesamt.pdf, Abruf: 20.04.2015
- [ABR11] Angermann, Anne; Beuschel, Michael; Rau, Martina; Wohlfarth, Ulrich: *Matlab – Simulink – Stateflow, Grundlagen, Toolboxes, Beispiele, 7. Auflage*. Oldenbourg Verlag, München, 2011
- [AUD15a] Audi AG: *CES 2015 – Mit Jack durch Kalifornien*, <http://blog.audi.de/2015/01/05/mit-jack-durch-kalifornien/>, Abruf: 14.04.2015

- [AUD15b] Audi AG: *CES 2015 – Welcome to Las Vegas*, <http://blog.audi.de/2015/01/06/welcom-to-las-vegas/>, Abruf: 14.04.2015
- [AUD15c] Audi AG: *Basisinformation, die Fahrerassistenzsysteme von morgen*, https://www.audi-mediaservices.com/publish/ms/content/de/public/hintergrundberichte/2012/03/08/0/die_fahrerassistenzsysteme0.html, Abruf: 22.04.2015
- [AUD14] Audi AG: *Next Generation – Audi at the 2014 International CES*, https://www.audi-mediaservices.com/publish/ms/content/en/public/hintergrundberichte/2014/01/07/next_generation_/next_generation_.html, Abruf: 13.02.2015
- [BAS12] Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.): *Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung, Gemeinsamer Schlussbericht der Projektgruppe*, Bergisch Gladbach, 2012
- [BAU14] Baur, Mathias Christian: *Modellierungsrahmen für Intelligente Verkehrssysteme zur simulationsbasierten Analyse ihrer Wirkungen auf den Straßenverkehr*, Dissertation, Technische Universität München, Lehrstuhl für Verkehrstechnik, München, 2014
- [BBE15] Behrisch, Michael; Bieker, Laura; Erdmann, Jakob; Knocke, Melanie; Krajzewicz, Daniel; Wagner, Peter: *Evolution of SUMO's Simulation Model*, <http://elib.dlr.de/88248/1/TRB-Circular-SUMO.pdf>, Abruf 10.3.2015
- [BBE11] Behrisch, Michael; Bieker, Laura; Erdmann, Jakob; Krajzewicz, Daniel: *SUMO – Simulation of Urban MObility*, Institute of Transportation Systems, German Aerospace Center, Berlin, 2011
- [BEN09] Benmimoun, Ahmed: *Verbesserung der Verkehrssicherheit durch einen kommunikationsbasierten Kreuzungsassistenten*. Dissertation, RWTH-Aachen, Institut für Kraftfahrwesen Aachen, Aachen, 2009
- [BFN13] Braess, Hans-Hermann; Fritzsche, Egbert; Nettleau, Hans-Jürgen; Seiffert, Ulrich; Zinke, Ekhard: *Anforderungen, Zielkonflikte*. In: Braess, Hans-Hermann; Seiffert, Ulrich (Hrsg.): *Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*, Wiesbaden, 2013
- [BK10] Berlitz, Jürgen; Kugele, Wolfgang: *Alltagsproblem Stau*. In: *Internationales Verkehrswesen* (62) 7+8 2010, S. 48-50
- [BK08] Behrisch, Michael; Krajzewicz, Daniel: *„Simulation of Urban Mobility“ – SUMO, Eine freie Verkehrssimulation*. http://sumo-sim.rg/pdf/de_SUMO_HU.pdf, Institut für Verkehrssystemtechnik, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Abruf: 20.08.2013

- [BKF11] Bley, Oliver; Kutzner, Ralf; Friedrich, Bernhard; Saust, Falko; Wille, Jörn-Marten; Maurer, Markus; Niebel, Wolfgang; Naumann, Sebastian; Wolf, Franziska; Schüler, Thorsten; Bogenberger, Klaus; Junge, Michael; Langenberg, Jens: *Kooperative Optimierung von Lichtsignalsteuerung und Fahrzeugführung*, In: AAET 2011 Automatisierungssystem, Assistenzsysteme und Eingebettete Systeme für Transportmittel, Braunschweig, 2011
- [BKR08] Boltze, Manfred; Kittler, Wolfgang; Roth, Nadine: *Strategien zur Stauvermeidung*. In: Straßenverkehrstechnik 5 2008, S. 265-273
- [BMV14] Bundesministerium für Verkehr-, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.): *Verkehr in Zahlen 2014 / 2015*. Deutscher Verkehrs-Verlag GmbH, Hamburg, 2014
- [BMV14] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.): *Verkehrsverflechtungsprognose 2030, Schlussbericht*, 2014
- [BMW15a] BMW AG: *Chauffeur inklusive: BMW Active Assist. Einblicke zum teil- und hochautomatischen Fahren von BMW ConnectedDrive*, <http://www.bmw.de/de/topics/faszination-bmw/connecteddrive/hochautomatisiertes-fahren.html>, Abruf 14.04.2015
- [BMW15b] BMW AG: *Stauassistent*, <http://www.bmw.de/de/footer/publications-links/technology-guide/stauassistent.html>, Abruf: 22.02.2015
- [BMW08a] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (Hrsg.): *Mobilität und Verkehrstechnologien – Das 3. Verkehrsforschungsprogramm der Bundesregierung*. http://www.tuvpt.de/fileadmin/pdf/Dokumentationen/verkehrsforschungsprogramm-mobilitaet-und-verkehrstechnologien_property_pdf_bereich_bmwi_sprache_de_rwb_true.pdf, Berlin, 2008
- [BMW08b] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (Hrsg.): *Verkehrsmanagement und Verkehrstechnologien – Mobile Zukunft mit intelligenten Verkehrssystemen*, Berlin, 2008
- [BMW07] BMW Group Forschung und Technik, *BMW Group Innovation Day 2007 Research and Technology*, https://www.press.bmwgroup.com/global/pressDetail.html?title=bmw-group-innovation-day-2007-research-and-technology&outputChannelId=6&id=T0012199EN&left_menu_item=node__5236#, Abruf: 23.04.2014
- [BRA10] Brands, Gilbert: *Das C++-Kompendium – STL, Objektfabriken, Exceptions, 2. Auflage*. Springer, Berlin, 2010
- [BRE04] Breuer, Karsten: *Verkehrsflusssimulation zur Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen*. Dissertation, RWTH-Aachen, Institut für Kraftfahrwesen Aachen, Aachen, 2004

- [BUR13] Burmeister, Hans David: *Untersuchung und Bewertung der Übertragungseigenschaften eines Fahrzeug-zu-X Kommunikationssystems*, Bachelorthesis, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Department Informations- und Elektrotechnik, Hamburg, 2013
- [BWS05] Boltze, Manfred; Wolfermann, Axel; Schäfer, Petra; Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.): *Leitfaden Verkehrstelematik – Hinweise zur Planung und Nutzung in Kommunen und Kreisen*. <http://www.bmvbs.de/cae/servlet/contentblob/60358/publicationFile/31206/>, Berlin, 2005
- [CBB04] Christen, Frederic; Benmimoun, Ahmed; Breuer, Karsten; Sandkühler, Dirk: *Verwendung des Verkehrsflusssimulationswerkzeugs PELOPS mit HiL-Funktionalität bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen*. RWTH-Aachen, Institut für Kraftfahrzeuge, Aachen, 2004
- [CHJ02] Czogalla, Olaf; Hoyer, Robert; Jumar, Ulrich: *Modelling and Simulation of Controlled Road Traffic*. In: Engell, Sebastian; Frehse, Goran; Schnieder, Eckehard (Hrsg.): *Modelling, Analysis, and Design of Hybrid Systems*, S. 419, Springer, Berlin, 2002
- [Chr10] Christen, Frederic: *PELOPS als Software-/Hardware In-the-Loop Tool Simulation*. http://www.ika.rwth-aachen.de/pdf_eb/gb6-17pelops_soft_hardware_sil.pdf, RWTH-Aachen, Institut für Kraftfahrzeuge, Aachen, 2010, Abruf: 20.08.2013
- [COM11] Comer, Douglas: *TCP/IP – Studienausgabe: Konzepte, Protokolle, Architekturen*. HJR-Verlag, Heidelberg, 2011
- [DAI15] Daimler AG: *DISTRONIC Plus mit Lenkassistent und Stop & Go Pilot in der S- und E-Klasse*, <http://www.daimler.com/dccom/0-5-1210218-49-1210321-1-0-0-1210228-0-0-135-7165-0-0-0-0-0-0-0.html>, Abruf: 22.02.2015
- [DAI13] Daimler AG: *Pionierleistung: Autonome Langstreckenfahrt im Überland- und Stadtverkehr: Mercedes-Benz S-Klasse INTELLIGENT DRIVE fährt autonom auf den Spuren von Bertha Benz*, <http://media.daimler.com/dcmedia/0-921-614307-49-1629819-1-0-1-1630016-0-0-12637-1549054-0-1-0-0-0-0-0.html>, Abruf: 14.04.2015
- [DET11] Detering, Stefan: *Kalibrierung und Validierung von Verkehrssimulationsmodellen zur Untersuchung von Verkehrsassistenzsystemen*. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Braunschweig, 2011
- [DIL73] Dilling, Jochen: *Fahrverhalten von Kraftfahrzeugen auf kurvigen Straßen*. In: Bundesministerium für Verkehr, Abt. Straßenbau (Hrsg.): *Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, Band 151, Bonn, 1973

- [DIN09] Norm DIN IEC 60050-351:2009-06: *International Electrotechnical Vocabulary – Part 351: Control technology*. 2009
- [DLR14] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt: *SUMO – Simulation of Urban MObility*, <http://www.dlr.de/ts/sumo>, Abruf: 02.10.2014
- [DON15] Donges, Edmund: *Fahrerverhaltensmodelle*. In: Winner, Hermann; Hakuli, Stephan; Wolf, Gabriele (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme - Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2015
- [DÖG07] Döge, Klaus-Peter: *Bildauswerteverfahren AVISTAS – Ermittlung des Verkehrszustandes durch Analyse stochastischer Signale aus Kamerabildern*. In: 3. VIMOS-Tagung, Dresden, 2007
- [DYN13] DYNA4 Driver Assistance: Fahrerassistenzsystem-Entwicklung mit Echtzeit-Simulation, <http://www.thesis-dynaware.com/produkte/driver-assistance/uebersicht-und-vorteile.html>, Abruf: 19.03.2015
- [ECK11] Eckstein, Lutz: *Sicherheit und Effizienz durch Fahrerassistenz*. In: AAET 2011 Automatisierungssystem, Assistenzsysteme und Eingebettete Systeme für Transportmittel, Braunschweig, 2011
- [ERL07] Erlemann, Kai: *Objektorientierte mikroskopische Verkehrsflusssimulation*. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Bochum, 2007
- [ETE12] Etemad, Aria: *euroFOT – European Large-Scale Field Operational Test on In-Vehicle Systems – Key Results*, http://www.eurofot-ip.eu/download/final_event_PDFs/eurofot_session_0_etemad_keyresults_v5%5B1%5D.pdf, Brüssel, Abruf: 28.03.2015
- [EUR15] euroFOT: *Pressemappe - euroFOT: Die acht zu testenden Systeme*, http://www.eurofot-ip.eu/download/events/eurofot_press_release_26062012_german.pdf, Abruf: 28.03.2015
- [FFV01] Fellendorf, Martin; Friedrich, Markus; Vortisch, Peter: *Kopplung makroskopischer und mikroskopischer Verkehrsmodelle – ein Verfahren für die Integration von großräumiger Planung und Detailplanung*. In: Tagungsband der 18. Verkehrswissenschaftlichen Tage, Technische Universität Dresden, Dresden, 2001
- [FKA15] Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen (Hrsg.): *PELOPS*, <http://www.fka.de/produktloesungen/pelops.php?ebene1=e&ebene2=e1>, Abruf: 26.04.2015

- [FKA07] Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen (Hrsg.): *PELOPS White Paper*. http://www.fka.de/pdf/pelops_whitepaper.pdf, Aachen, 2007, Abruf: 20.08.2013
- [FRI08] Friedrich, Markus: *Wirkungen individueller und kollektiver Verkehrsbeeinflussungssysteme*. In: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (Hrsg.): *Verkehrsmanagement und Verkehrstechnologien – Mobile Zukunft mit intelligenten Verkehrssystemen*, S. 125, Berlin, 2008
- [FV10] Fellendorf, Martin; Vortisch, Peter: *Microscopic Traffic Flow Simulator VISSIM*. In: *Fundamentals of Traffic Simulation*, Jaume Barceló (Hrsg.), Springer Verlag, Berlin, 2010
- [FWN13] Friedrich, Bernhard; Wagner, Peter; Niebel, Wolfgang; Herrmann, Andreas; Naumann, Sebastian; Bley, Oliver; Kutzner, Ralf; Maurer, Markus; Saust, Falko; Schüler, Thorsten; Poppe, Holger; Junge, Michael; Langenberg, Jens: *KOLINE – Kooperative und optimiert Lichtsignalsteuerung in städtischen Netzen. Schlussbericht zum Forschungsprojekt, Förderkennzeichen 19P9002*, 2013
- [GSS15] Gasser, Tom Michael; Seeck, Andre; Smith, Bryant Walker: *Rahmenbedingungen für die Fahrerassistenzentwicklung*. In: Winner, Hermann; Hakuli, Stephan; Wolf, Gabriele (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme - Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2015
- [GEO13] Georgiev, Veselin: *Design und Implementierung eines Ampelassistenten für Android*, Diplomarbeit, TU München, Lehrstuhl für Medientechnik, München, 2013
- [GIP08] Gipper, Angelika: *Die Verkehrsentwicklung in Deutschland und deren Auswirkungen auf die Verkehrsinfrastruktur*. http://ise.kit.edu/rd_download/SBT_Kolloquium_SBT_08-11_A.Gipper.pdf, 2008
- [GKL06] Geimer, Marcus; Krüger, Thomas; Linsel, Peter: *Co-Simulation, gekoppelte Simulation oder Simulatorkopplung – Ein Versuch der Begriffsvereinheitlichung*. In: *O+P Ölhydraulik und Pneumatik 11-12 2016*, S. 572-576
- [GL11] Geistefeldt, Justin; Lohoff, Jan: *Stausituation auf den Autobahnen in Nordrhein-Westfalen*, http://www.wirtschaft.nrw.de/presse/_container_presse/StausituationNRW_Schlussbericht_Endfassung-Presse.pdf, Abruf: 20.04.2015
- [HBS01] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen*. FGSV-Verlag, Köln, 2001
- [HEL97] Helbing, Dirk: *Verkehrsdynamik – Neue physikalische Modellierungskonzepte*. Springer, Berlin, 1997

- [HFK08] Halbritter, Günter; Fleischer, Torsten; Küpsch, Christel: *Strategien für Verkehrsinnovationen: Umsetzungsbedingungen – Verkehrstelematik – internationale Erfahrungen*. Edition Sigma, 2008
- [HKD15] Hentschel, Peter; König, Peter; Dauer, Peter; Floegel, Johannes: *Straßenverkehrsrecht – Straßenverkehrsgesetz, Straßenverkehrsordnung, Fahrerlaubnisverordnung, Fahrzeugzulassungsverordnung, Straßenverkehrszulassungsordnung, EG-Fahrzeuggenehmigungsverordnung (Auszug), Bußgeldkatalog, Gesetzesmaterialien, Verwaltungsvorschriften und einschlägige Bestimmungen des StGB, 43. Auflage*. Beck, München, 2015
- [HÖF06] Höfler, Frank: *Verkehrswesen – Praxis, Band 2*. Bauwerk Verlag GmbH, Berlin, 2006
- [HOY15] Hoyer, Robert: *Verkehrliche Potenziale des vorausschauenden Fahrens an kooperativen Lichtsignalanlagen*, http://www.ftm.mw.tum.de/uploads/media/32_Hoyer.pdf, Kassel, Abruf: 17.01.2015
- [INV15a] Invent – intelligenter Verkehr und nutzergerechte Technik: *Projekte*, <http://www.invent-online.de/de/projekte.html>, Abruf: 21.04.2015
- [INV15b] Invent – intelligenter Verkehr und nutzergerechte Technik: *Netzausgleich Individualverkehr NIV*, <http://www.invent-online.de/downloads/NIV-handout-D.pdf>, Abruf: 21.04.2015
- [INV15c] Invent – intelligenter Verkehr und nutzergerechte Technik: *Verkehrsleistungsassistentz VLA*, <http://www.invent-online.de/downloads/VLA-handout-D.pdf>, Abruf: 21.04.2015
- [INV06a] Invent – intelligenter Verkehr und nutzergerechte Technik: *Schlussbericht Stauassistent (STA) und Vorausschauende aktive Sicherheit (VAS)*, Ingolstadt, 2006
- [INV06b] Invent – intelligenter Verkehr und nutzergerechte Technik: *Schlussbericht Verkehrliche Wirkung, Rechtsfragen, Akzeptanz (VRA)*, Aachen, 2006
- [KAI09] Kaiser, Richard: *C++ mit Visual C++ 2008: Einführung in Standard-C++, C++/CLI und die objektorientierte Windows .NET Programmierung*. Springer, Berlin, 2009
- [KER04] Kerner, Boris: *Physics of Traffic: Empirical Freeway Pattern Features, Engineering Applications, and Theory*. Springer, Berlin, 2004
- [KES09] Kesting, Arne: *Microscopic Modeling of Human and Automated Driving: Towards Traffic-Adaptive Cruise Control*. Dissertation, TU Dresden, Institut für Wirtschaft und Verkehr, Dresden, 2009

- [KOL15] KOLINE – Kooperative und optimierte Lichtsignalsteuerung in städtischen Netzen: *Kooperative und optimierte Lichtsignalsteuerung in städtischen Netzen*, <http://www.projekt-koline.de>, Abruf: 21.04.2015
- [KÖL07] Kölle, Matthias: *Verkehrsbeeinflussung durch Strecken- und Netzbeeinflussungsanlagen und ihre Wirkungen*. In Symposium „Stauvermeidung“ des Innenministeriums Baden-Württemberg, Killesberg, 2007
- [KPK10] Kranke, Florian; Poppe, Holger; Kesting, Arne; Treiber, Martin: *Der Baustellenlotse – Ein stauvermeidendes Fahrerassistenzsystem*. In: *Straßenverkehrstechnik* 1.2010, S. 12-19
- [KS05] Kuhlins, Stefan; Schader, Martin: *Die C++ Standardbibliothek – Einführung und Nachschlagewerk, 4. Auflage*. Springer, Berlin, 2005
- [KTH10] Kesting, Arne; Treiber, Martin; Helbing, Dirk: *Enhanced Intelligent Driver Model to Assess the Impact of Driving Strategies on Traffic Capacity*. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 368, 4585-4605, 2010
- [KÜH05] Kühne, Reinhart; Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit (Hrsg.): *Hinweise zum Fundamentaldiagramm – Grundlagen und Anwendungen*. FGSV-Verlag, Köln, 2005
- [KÜH04] Kühne, Reinhart: *FGSV Merkblatt (Entwurf), Das Fundamentaldiagramm – Grundlagen und Anwendungen*. http://www.tft.px.edu/docs/Greenshields_Publication.pdf, 2004
- [LEM14] Lemmer, Karsten: *Die Anwendungsplattform Intelligente Mobilität (AIM) als Beitrag zur Erhöhung der Verkehrssicherheit*, http://elib.dlr.de/84984/1/VS12020_Vortrag_Prof_Lemmer_fürDownload_131030.pdf, 2013, Abruf: 06.01.2014
- [LEM13] Lemmer, Karsten: *Was bewegt uns morgen? Forschung für die Mobilität der Zukunft*, http://elib.dlr.de/83766/1/Vortrag_Prof_Lemmer_130620_Onlineversion.pdf, 2013, Abruf: 20.12.2013
- [LEM11] Lemmer, Karsten, et al.; Acatech – Konvent der Technikwissenschaften der Union der deutschen Akademien der Wissenschaft e. V. (Hrsg.): *Handlungsfeld Mobilität. Infrastruktur sichern. Verkehrseffizienz verbessern. Exportchancen ergreifen*, http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Publikationen/acatech_diskutiert/acatech_diskutiert_Handlungsfeld-Mobilität_WEB.pdf, 2011, Abruf: 18.08.2013
- [LRB12] Lüßmann, Jonas; Rommerskirchen, Christoph; Bengler, Klaus; Busch, Fritz: *Netzweite Wirkungsermittlung kooperativer Fahrerassistenzsysteme zur Verbrauchsreduzierung mittels Simulation – Beispiel eCoMove*, In: 5. Tagung Fahrerassistenzsysteme, München, 2012

- [LSM12] Langenberg, Jens; Saust, Falko; Maurer, Markus, Poppe, Holger: *Verkehrsoptimierte Fahrzeugregelung an Lichtsignalanlagen. Projekt KOLINE: weniger Stopps, Rückstau, Verbrauch und Emissionen*. In: 28. VDI / VW-Gemeinschaftstagung Fahrerassistenz und integrierte Sicherheit, Wolfsburg, 2012
- [MAT15] Matlab: *Die Sprache für technische Berechnungen*. <http://www.mathworks.de/products/matlab/>, Abruf: 20.04.2015
- [MAT12] Mathworks (Hrsg.): *Simulink – Developing S-Functions R2012b*. <http://www.mathworks.de/products/matlab/>, Abruf: 02.11.2013
- [MBW10] Mandl, Peter; Bakomenko, Andreas; Weiß, Johannes: *Grundkurs Datenkommunikation – TCP / IP-basierte Kommunikation: Grundlagen, Konzepte, Standards, 2. Auflage*. Vieweg Teubner, Wiesbaden, 2010
- [MB06] Menig, Cornelius; Busch, Fritz: *Innerstädtische Verkehrsoptimierung durch C-2-X Kommunikation*, TU München, Lehrstuhl für Verkehrstechnik, München, 2006
- [MVI12] Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg (Hrsg.): *Bericht zum Staatshaushaltsplan 2013 / 2014*, 2012
- [MKK06] McDonald, Mike ; Keller, Hartmut ; Klijnhout, Job ; Mauro, Vito ; Hall, Richard ; Spence, Angela ; Hecht, Christoph ; Fakler, Oliver: *Intelligent transport systems in Europe - opportunities for future research*. World Scientific, 2006
- [MSK09] Miegler, Maximilian; Schieber, Reinhard; Kern, Andreas; Ganslmeier, Thomas; Nentwig, Mirko: *Hardware-in-the-loop-Test von vorausschauenden Fahrerassistenzsystemen*. In: ATZelektronik 05 2009, S. 14-19
- [NAA98] Naab, Karl: *ACC in Ballungsräumen*. In: Pischinger, Stefan (Hrsg.): 7. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Aachen, 1998
- [NAH09] Nahrstedt, Harald: *C++ für Ingenieure – Effizient programmieren lernen*. Vieweg Teubner, Wiesbaden, 2009
- [NEU12] von Neumann-Cosel, Kilian: *Virtual Test Drive, Simulation umfeldbasierter Fahrzeugfunktionen*, Dissertation, Technische Universität München, Lehrstuhl für Echtzeitsysteme und Robotik, München, 2012
- [NIE13] Niebel, Wolfgang: *Individueller Schlussbericht zum Forschungsprojekt KOLINE – Kooperative und Optimierte Lichtsignalsteuerung in städtischen Netzen*. http://elib.dlr.de/82186/1/BMWi_19P9002B_KOLINE_Schlussbericht-PartnerDLR.pdf, 2013
- [NS92] Nagel, Kai; Schreckenberg, Michael: *A cellular autoation model for freeway traffic*. http://www.uni-due.de/imperia/md/content/ptt/paper/1992_origca_pdf, In: Journal de Physique I France, 2:2221-2229, 1992

- [OTT11] Otto, Thomas: *Kooperative Verkehrsbeeinflussung und Verkehrssteuerung an signalisierten Knotenpunkten*. Dissertation, Universität Kassel, Institut für Verkehrswesen, Kassel, 2011
- [PAV07] Pavlidis, Panos: *Werkzeuge für die Verkehrssimulation*. Semesterarbeit, Universität Karlsruhe, Institut für Programmstrukturen und Datenorganisation, Lehrstuhl für Systeme der Informationsverwaltung, Karlsruhe, 2007
- [PKS09] Poppe, Holger; Kranke, Florian; Scheurer, Torsten: *Dynamische Generierung von Strecken- und Verkehrszustandsattributen für Fahrerassistenzsysteme mit Car-to-X-Kommunikation*. In: AAET 2009 – Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel, Gesamtzentrum für Verkehr e.V., 2009, S. 228–237
- [PTV15a] PTV Group: *PTV Vissim*. <http://vision-traffic.ptvgroup.com/de/produkte/ptv-vissim/>, Abruf 20.02.2015
- [PTV15b] PTV Group (Hrsg.): *Was hält eigentlich den Verkehr im Fluss?* http://vision-traffic.ptvgroup.com/fileadmin/files_ptvision/Downloads_N/0_General/2_Products/2_PTV_Vissim/DE_PTV_Vissim_Brochure.pdf, Abruf 20.02.2015
- [PWC15] PriceWaterhouseCoopers (Hrsg.): *Megacities - eine logistische Herausforderung für Güter und Menschen*, <http://www.pwc.de/de/transport-und-logistik/megacities-eine-logistische-herausforderung-fuer-gueter-und-menschen.jhtml>, Abruf 14.02.2015
- [ROO15] Roos, Horst: *Drei Ansätze zur Optimierung des Straßenverkehrs*, In: Straßenverkehrstechnik 3 2015, S. 175-182
- [REI10] Reif, Konrad: *Fahrstabilisierungssysteme und Fahrerassistenzsysteme*. Vieweg-Teubner Verlag, Wiesbaden, 2010
- [RH12] Rudolph, Felix; Hoyer, Robert: *Smartphone-App-Entwicklung für kooperative Lichtsignalanlagen*. In: VDI-Gesellschaft Fahrzeugtechnik (Hrsg.): *Elektronik im Kraftfahrzeug*. VDI-Bericht 2179, S. 87-98, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2012
- [SKM14] Santa, Claudia; Kath, Jakob; Mathias, Paul; Schendzielorz, Tobias: *Potenziale kooperativer Lichtsignalsteuerung zur Steigerung der Verkehrseffizienz und -sicherheit*, In: Straßenverkehrstechnik 10 2014, S. 676-683
- [SS13] Schnieder, Eckehard; Schnieder, Lars: *Verkehrssicherheit – Maße und Modelle, Methoden und Maßnahmen für den Straßen- und Schienenverkehr*, Springer Vieweg, Berlin, 2013
- [SCH07] Schnieder, Eckehard (Hrsg.): *Verkehrsleittechnik – Automatisierung des Straßen- und Schienenverkehrs*. Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2007

- [SEI10] Seiffert, Ulrich: *Fahrerassistenz versus Kundenakzeptanz*. In: 28. VDI / VW-Gemeinschaftstagung Fahrerassistenz und integrierte Sicherheit, Wolfsburg, 2010
- [SIM15] Simulink: *Simulation and Model-Based Design*. <http://www.mathworks.de/products/simulink/>, Abruf: 20.04.2015
- [SIM13] Sichere Intelligente Mobilität, Testfeld Deutschland (Hrsg.), *Deliverable D5.5, TP5 Abschlussbericht – Teil A*, 2013
- [SKV05] Steierwald, Gerd; Künne, Hans-Dieter; Vogt, Walter (Hrsg.): *Stadtverkehrsplanung – Grundlagen, Methoden, Ziele. 2., neu bearbeitete und erweiterte Auflage*. Springer, Berlin, 2005
- [SL11] Schnabel, Werner; Lohse, Dieter: *Grundlagen der Straßenverkehrstechnik, Band 1*. Beuth, Berlin, 2011
- [SR03] Stauss, Hans-Jürgen; Riemann, Axel: *Staufreier Verkehr durch den Einsatz von Verkehrsassistenzsystemen*. In: VDA Verband der Automobilindustrie, Technischer Kongress 2003, Wolfsburg, 2003
- [SSN92] Schreckenberg, Michael; Schadschneider, Andreas; Nagel, Kai: *Zellularautomaten simulieren Straßenverkehr*. In: Physikalische Blätter, Band 52, S. 460-462, 1992
- [STA01] Stauss, Hans-Jürgen: *Mesoskopische Simulation des Straßenverkehrs mit telematikgestützter Zielführung*. Dissertation, Gemeinsame Fakultät für Maschinenbau und Elektrotechnik der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Braunschweig, 2001
- [STR11] Stroustrup, Bjarne: *Die C++ Programmiersprache, 4. Auflage*. Addison-Wesley, München, 2011
- [SUM15] SUMO: *Simulation of Urban Mobility*, <http://sumo-sim.org>, Abruf: 20.04.2015
- [SUM14] SUMO: *SUMO2014 – Modeling Mobility with Open Data – Proceedings*, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 2014
- [SUM13] SUMO: *1st SUMO User Conference 2013 – Proceedings*, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 2013
- [TK10] Treiber, Martin; Kesting, Arne: *Verkehrsdynamik und -simulation – Daten, Modelle und Anwendungen der Verkehrsdynamik*. Springer Verlag, Heidelberg, 2010
- [TRA15] Travolution: *Travolution in Ingolstadt*, <http://www.travolution-ingolstadt.de/index.php?id=2>, Abruf: 23.04.2015

- [TRA06] Trapp, Roland; Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit (Hrsg.): *Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation*, FGSV Verlag, Köln, 2006
- [TSS15a] Transport Simulation Systems (Hrsg.): *Microsimulation modeling – Not just a pretty interface*. <http://www.aimsun.com/press/Not%20Just%20a%20Pretty%20Interface%20Data%20&%20Modelling%20LTT.pdf>, Abruf: 20.01.2015
- [TSS15b] Transport Simulation Systems (Hrsg.): *AIMSUN*, <http://www.aimsun.com/wp>, Abruf: 26.04.2015
- [TSS09a] Transport Simulation Systems (Hrsg.): *Microsimulator and Mesosimulator in Aimsun 6 User's Manual – Draft Version*. 2009
- [TSS09b] Transport Simulation Systems (Hrsg.): *Aimsun Microsimulator API Manual – Draft Version*, 2009
- [UN12] United Nations Secretariat, Department of Economic and Social Affairs (Hrsg.): *World Urbanization Prospects – The 2011 Revision*. 2012, http://esa.un.org/unup/pdf/wup2011_highlights.pdf; Abruf: 04.10.2014
- [UN02] United Nations Secretariat, Department of Economic and Social Affairs (Hrsg.): *World Urbanization Prospects – The 2001 Revision*. 2002, <http://www.un.org/esa/population/publications/wup2001/wup2001dh.pdf>, Abruf: 18.08.2013
- [URB15a] UR:BAN – Urbaner Raum: Benutzergerechte Assistenzsysteme und Netzmanagement: *Urbaner Raum: Benutzergerechte Assistenzsysteme und Netzmanagement*, <http://www.urban-online.org/de/urban.html>, Abruf: 21.04.2015
- [URB15b] UR:BAN – Urbaner Raum: Benutzergerechte Assistenzsysteme und Netzmanagement: *Die Forschungsinitiative für den urbanen Verkehr*, http://www.urban-online.org/cms/download/de/Broschueren/projektbeschreibung_urban.pdf, Abruf: 21.04.2015
- [VBS06] Vollrath, Mark; Briest, Susanne; Schießl, Carolin; Drewes, Jörn; Becker, Uwe: *Ableitung von Anforderungen an Fahrerassistenzsysteme aus Sicht der Verkehrssicherheit* In: Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.), Fahrzeugtechnik Heft F60, Bergisch Gladbach, 2006
- [VDA14] Verband der Automobilindustrie: *CarIT-Kongress auf der IAA Nutzfahrzeuge*, <https://www.vda.de/de/presse/Pressemeldungen/85.html>, Hannover, Abruf: 24.04.2015
- [VTD15] Virtual Test Drive, <http://www.vires.com/index.html>, Abruf: 19.03.2015

- [VW15] Volkswagen AG: *Stauassistent – Unterstützung bei Stop-and-go-Verkehr*, <http://www.volkswagen.de/de/models/passat-variant/highlights.html#/flash=eba6b39df62bbda9d8098101d6cea0b0@Assistenz-systeme%2Blayer5404a2ead1bc9e843f756fe7344f9d5a>, Abruf 20.03.2015
- [VW13] Volkswagen AG: *Nachhaltigkeit Bericht 2012*, http://nachhaltigkeitsbericht2012.volkswagenag.com/fileadmin/download/pdf/VWAG_NHB_2012_d_online.pdf, Wolfsburg, 2013
- [VW12] Volkswagen AG (Hrsg.): *Nachhaltigkeit Bericht 2011*, http://www.business-and-biodiversity.de/fileadmin/user_upload/documents/The_Good_Companies/Nachhaltigkeitsberichte/vwag_nhb_2011_d_web_neu.pdf?PHPSESSID=6b8d95a4b8fb714d4a1f5d32b0030099, Wolfsburg, 2012
- [VW02] Volkswagen AG (Hrsg.): *Umweltbericht 2001 / 2002- Mobilität und Nachhaltigkeit Volkswagen AG*, http://volkswagen.de/content/medialib/vwd4/de/Volkswagen/Nachhaltigkeit/service/download/umweltberichte/umweltbericht_20012002deutsch48mb/_jcr_content/renditions/rendition.file/umweltberichte_par_0009_file.pdf, Wolfsburg, 2002
- [WEI00] Weillkes, Michael: *Auslegung und Analyse von Fahrerassistenzsystemen mittels Simulation*. Dissertation, RWTH-Aachen, Institut für Kraftfahrwesen Aachen, Aachen, 2000
- [WIK11] Projekt wiki: *Abschlussveranstaltung*. http://isv.uni-stuttgart.de/vuv/projekte/wiki/downloads/wiki_Abschlussveranstaltung.pdf, letzter Abruf 23.08.2013
- [WIL04] Wilschko, Thomas: *Sichere Information durch infrastrukturgestützte Fahrerassistenzsysteme zur Steigerung der Verkehrssicherheit an Straßenknotenpunkten*. Dissertation, Universität Stuttgart, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften, Stuttgart, 2004
- [WIN02] Winner, Hermann: *Fahrerassistenzsysteme – Stand der Technik und Ausblick*. In: 1. Autoforum Sachsen – Sachsen wieder Autoland. VDI-Berichte 1702, 2002
- [WIS15] Wissmann, Matthias: *Vernetztes und automatisiertes Fahren sowie Elektromobilität sind die Innovationstreiber der Automobilindustrie*, <https://www.vda.de/de/presse/Pressemeldungen/20150319-Vernetztes-und-automatisiertes-Fahren-sowie-Elektromobilit-t-sind-die-Innovationstreiber-der-Automobilindustrie.html>, Filderstadt, Abruf: 28.04.2015

- [WPR08] Wegener, Axel; Piórkowski, Michal; Raya, Maxim; Hellbrück, Horst; Fischer, Stefan; Hubaux, Jean-Pierre: *TraCI: An Interface for Coupling Road Traffic and Network Simulators*. In: Proceedings of the 11th communications and networking simulation symposium, Seite 155-163, Ottawa, 2008
- [WR06] Wallentowitz, Henning; Reif, Konrad (Hrsg.): *Handbuch Kraftfahrzeugelektronik – Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen*. Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2007
- [ZIM83] Zimdahl, Walter: *Wolfsburger Welle – Ein Projekt der Volkswagen Forschung*, Wolfsburg, 1983
- [ZR11] Zacher, Serge; Reuter, Manfred: *Regelungstechnik für Ingenieure, Analyse, Simulation und Entwurf von Regelkreisen, 13. Auflage*. Vieweg-Teubner, Wiesbaden, 2011
- [ZSB04] Zavrel, Martin; Siedersberger, Karl-Heinz; Breu, Alex; Maurer, Markus: *Stauassistent: teilautomatisierte Fahrzeugführung im Niedergeschwindigkeitsbereich*. In: Steuerung und Regelung von Fahrzeugen und Motoren – AUTOREG, Wiesloch, VDI-Berichte 1828, 2004

10 Anhang

A. Grundsätzliche Anforderungen an ein Simulationswerkzeug für Verkehrsassistenzsysteme

- Automatisierbarkeit von Simulationsdurchläufen für Parametervariationen und die Optimierung von Assistenzsystemen
- Bereitstellung aller notwendigen Eingangsdaten der Assistenzsystemalgorithmen durch die Verkehrsflusssimulation oder selbst entwickelte Modelle
- Bestimmbarkeit aller notwendigen Verkehrskenngrößen für eine systematische Bewertung des Verkehrs und der Wirkung von Verkehrsassistenzsystemen beziehungsweise infrastrukturseitigen Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen
- Nutzbarkeit von existierenden mikroskopischen Verkehrsflussmodellen zur Steigerung der Vergleichbarkeit mit bisherigen Untersuchungen
- Realistische Abbildung der Wechselwirkungen zwischen Fahrer-Fahrzeug-Einheiten mit Verkehrsassistenzsystemen und dem umgebenden Verkehr
- Reproduzierbarkeit der Simulation
- Systematische Kalibrierung von Verkehrsszenarien für unterschiedliche Verkehrsassistenzsysteme und infrastrukturseitige Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen
- Systematische Modellierung und Simulation realer Verkehrsnetze mit realen Verkehrsbelastungen, sowohl von kleinen Netzen mit wenigen Fahrer-Fahrzeug-Einheiten bis hin zur Abbildung ganzer Städte oder Autobahnabschnitten mit hohem Verkehrsaufkommen
- Systematische Modellierung und Simulation informierender und aktiv regelnder Verkehrsassistenzsysteme unter Berücksichtigung von variablen Befolgungsraten und Befolgungsgenauigkeiten
- Systematische Modellierung und Simulation infrastrukturseitiger Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen
- Systematische Modellierung von Fahrer-Fahrzeug-Einheiten ohne Verkehrsassistenzsystem unter Berücksichtigung verschiedener Fahrertypen, Abbildung eines individuellen Verhaltensmodelles für jede Fahrer-Fahrzeug-Einheit mit verschiedenen Submodellen und Modellparametern
- Übertragbarkeit simulierter Assistenzsysteme in Versuchsfahrzeuge zum Nachweis der Funktionsfähigkeit in der Praxis
- Umsetzung der Kopplung von Verkehrsassistenzsystem- mit mikroskopischen Verkehrsflussmodellen
- Untersuchung beliebiger Ausstattungsraten

B. Simulationsszenario Braunschweig-Dibbesdorf, Ampelphasenassistenzsystem

06.04.2011, 7:30 Uhr bis 8:00 Uhr, Lichtsignalanlagenschaltung

Phase	Phase pro Fahrtrichtung	Dauer [s]
1	Grün Wolfsburg, Rot links, Grün Braunschweig, Rot Dibbesdorf	48
	Grün Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Grün Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Grün Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
	Grün Wolfsburg, Grün links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	6
	Gelb Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	1
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Grün Dibbesdorf	0
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	3
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Gelb Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
2	Grün Wolfsburg, Rot links, Grün Braunschweig, Rot Dibbesdorf	32
	Grün Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Grün Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Grün Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
	Grün Wolfsburg, Grün links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	20
	Gelb Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	1
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Grün Dibbesdorf	0
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	3
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Gelb Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
3	Grün Wolfsburg, Rot links, Grün Braunschweig, Rot Dibbesdorf	41
	Grün Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Grün Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Grün Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
	Grün Wolfsburg, Grün links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	12
	Gelb Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	1
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Grün Dibbesdorf	0
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	3
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Gelb Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1

Phase	Phase pro Fahrtrichtung	Dauer [s]
4	Grün Wolfsburg, Rot links, Grün Braunschweig, Rot Dibbesdorf	23
	Grün Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Grün Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Grün Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
	Grün Wolfsburg, Grün links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	19
	Gelb Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	1
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Grün Dibbesdorf	0
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	3
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Gelb Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
5	Grün Wolfsburg, Rot links, Grün Braunschweig, Rot Dibbesdorf	30
	Grün Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Grün Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Grün Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
	Grün Wolfsburg, Grün links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	10
	Gelb Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	1
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Grün Dibbesdorf	0
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	3
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Gelb Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
6	Grün Wolfsburg, Rot links, Grün Braunschweig, Rot Dibbesdorf	54
	Grün Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Grün Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Grün Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
	Grün Wolfsburg, Grün links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	10
	Gelb Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	1
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Grün Dibbesdorf	0
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	3
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Gelb Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1

Phase	Phase pro Fahrtrichtung	Dauer [s]
7	Grün Wolfsburg, Rot links, Grün Braunschweig, Rot Dibbesdorf	39
	Grün Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Grün Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Grün Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
	Grün Wolfsburg, Grün links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	19
	Gelb Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	1
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Grün Dibbesdorf	0
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	3
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Gelb Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
8	Grün Wolfsburg, Rot links, Grün Braunschweig, Rot Dibbesdorf	63
	Grün Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Grün Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Grün Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
	Grün Wolfsburg, Grün links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	19
	Gelb Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	1
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Grün Dibbesdorf	0
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	3
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Gelb Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
9	Grün Wolfsburg, Rot links, Grün Braunschweig, Rot Dibbesdorf	46
	Grün Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Grün Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Grün Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	0
	Grün Wolfsburg, Grün links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	0
	Gelb Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	0
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	1
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Grün Dibbesdorf	0
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	3
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Gelb Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1

Phase	Phase pro Fahrtrichtung	Dauer [s]
10	Grün Wolfsburg, Rot links, Grün Braunschweig, Rot Dibbesdorf	20
	Grün Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Grün Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Grün Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
	Grün Wolfsburg, Grün links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	11
	Gelb Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	1
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Grün Dibbesdorf	0
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	3
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Gelb Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
11	Grün Wolfsburg, Rot links, Grün Braunschweig, Rot Dibbesdorf	31
	Grün Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Grün Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Grün Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
	Grün Wolfsburg, Grün links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	9
	Gelb Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	1
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Grün Dibbesdorf	0
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	3
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Gelb Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
12	Grün Wolfsburg, Rot links, Grün Braunschweig, Rot Dibbesdorf	45
	Grün Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Grün Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Grün Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
	Grün Wolfsburg, Grün links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	6
	Gelb Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	1
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Grün Dibbesdorf	0
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	3
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Gelb Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1

Phase	Phase pro Fahrtrichtung	Dauer [s]
13	Grün Wolfsburg, Rot links, Grün Braunschweig, Rot Dibbesdorf	14
	Grün Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Grün Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Grün Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
	Grün Wolfsburg, Grün links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	19
	Gelb Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	1
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Grün Dibbesdorf	0
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	3
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Gelb Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
14	Grün Wolfsburg, Rot links, Grün Braunschweig, Rot Dibbesdorf	53
	Grün Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Grün Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Grün Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
	Grün Wolfsburg, Grün links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	13
	Gelb Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	1
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Grün Dibbesdorf	0
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	3
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Gelb Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
15	Grün Wolfsburg, Rot links, Grün Braunschweig, Rot Dibbesdorf	53
	Grün Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Grün Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Grün Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
	Grün Wolfsburg, Grün links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	20
	Gelb Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	1
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Grün Dibbesdorf	0
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	3
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Gelb Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1

Phase	Phase pro Fahrtrichtung	Dauer [s]
16	Grün Wolfsburg, Rot links, Grün Braunschweig, Rot Dibbesdorf	30
	Grün Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Grün Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Grün Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
	Grün Wolfsburg, Grün links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	18
	Gelb Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	1
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Grün Dibbesdorf	0
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	3
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Gelb Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
17	Grün Wolfsburg, Rot links, Grün Braunschweig, Rot Dibbesdorf	17
	Grün Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Grün Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Grün Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
	Grün Wolfsburg, Grün links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	32
	Gelb Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	1
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Grün Dibbesdorf	0
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	3
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Gelb Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
18	Grün Wolfsburg, Rot links, Grün Braunschweig, Rot Dibbesdorf	25
	Grün Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Grün Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Grün Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
	Grün Wolfsburg, Grün links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	10
	Gelb Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	1
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Grün Dibbesdorf	0
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	3
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Gelb Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1

Phase	Phase pro Fahrtrichtung	Dauer [s]
19	Grün Wolfsburg, Rot links, Grün Braunschweig, Rot Dibbesdorf	23
	Grün Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Grün Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Grün Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
	Grün Wolfsburg, Grün links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	14
	Gelb Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	1
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Grün Dibbesdorf	0
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	3
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Gelb Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
20	Grün Wolfsburg, Rot links, Grün Braunschweig, Rot Dibbesdorf	46
	Grün Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Grün Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Grün Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	0
	Grün Wolfsburg, Grün links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	0
	Gelb Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	0
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	1
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Grün Dibbesdorf	0
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	3
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Gelb Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
21	Grün Wolfsburg, Rot links, Grün Braunschweig, Rot Dibbesdorf	20
	Grün Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Grün Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Grün Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
	Grün Wolfsburg, Grün links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	33
	Gelb Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	1
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Grün Dibbesdorf	0
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	3
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Gelb Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1

Phase	Phase pro Fahrtrichtung	Dauer [s]
22	Grün Wolfsburg, Rot links, Grün Braunschweig, Rot Dibbesdorf	41
	Grün Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Grün Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Grün Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
	Grün Wolfsburg, Grün links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	15
	Gelb Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	1
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Grün Dibbesdorf	0
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	3
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Gelb Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
23	Grün Wolfsburg, Rot links, Grün Braunschweig, Rot Dibbesdorf	22
	Grün Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Grün Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Grün Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
	Grün Wolfsburg, Grün links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	14
	Gelb Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	1
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Grün Dibbesdorf	0
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	3
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Gelb Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
24	Grün Wolfsburg, Rot links, Grün Braunschweig, Rot Dibbesdorf	30
	Grün Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Grün Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Grün Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
	Grün Wolfsburg, Grün links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	14
	Gelb Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	1
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Grün Dibbesdorf	0
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	3
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Gelb Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1

Phase	Phase pro Fahrtrichtung	Dauer [s]
25	Grün Wolfsburg, Rot links, Grün Braunschweig, Rot Dibbesdorf	31
	Grün Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Grün Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Grün Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
	Grün Wolfsburg, Grün links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	10
	Gelb Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	1
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Grün Dibbesdorf	0
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	3
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Gelb Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
26	Grün Wolfsburg, Rot links, Grün Braunschweig, Rot Dibbesdorf	28
	Grün Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Grün Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Grün Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
	Grün Wolfsburg, Grün links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	20
	Gelb Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	1
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Grün Dibbesdorf	0
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	3
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Gelb Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
27	Grün Wolfsburg, Rot links, Grün Braunschweig, Rot Dibbesdorf	34
	Grün Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Grün Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Grün Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
	Grün Wolfsburg, Grün links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	18
	Gelb Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	1
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Grün Dibbesdorf	0
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	3
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Gelb Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1

Phase	Phase pro Fahrtrichtung	Dauer [s]
28	Grün Wolfsburg, Rot links, Grün Braunschweig, Rot Dibbesdorf	30
	Grün Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Grün Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Grün Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
	Grün Wolfsburg, Grün links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	19
	Gelb Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	1
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Grün Dibbesdorf	0
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	3
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Gelb Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
29	Grün Wolfsburg, Rot links, Grün Braunschweig, Rot Dibbesdorf	40
	Grün Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Grün Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Grün Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
	Grün Wolfsburg, Grün links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	18
	Gelb Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	1
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Grün Dibbesdorf	0
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	3
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Gelb Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
30	Grün Wolfsburg, Rot links, Grün Braunschweig, Rot Dibbesdorf	26
	Grün Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Grün Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Grün Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
	Grün Wolfsburg, Grün links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	18
	Gelb Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	1
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Grün Dibbesdorf	0
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	3
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Gelb Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1

Phase	Phase pro Fahrtrichtung	Dauer [s]
31	Grün Wolfsburg, Rot links, Grün Braunschweig, Rot Dibbesdorf	23
	Grün Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Grün Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Grün Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
	Grün Wolfsburg, Grün links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	29
	Gelb Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	1
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Grün Dibbesdorf	0
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	3
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Gelb Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
32	Grün Wolfsburg, Rot links, Grün Braunschweig, Rot Dibbesdorf	35
	Grün Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Grün Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Grün Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	0
	Grün Wolfsburg, Grün links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	0
	Gelb Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	0
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	1
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Grün Dibbesdorf	0
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	3
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Gelb Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
33	Grün Wolfsburg, Rot links, Grün Braunschweig, Rot Dibbesdorf	18
	Grün Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Grün Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Grün Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	0
	Grün Wolfsburg, Grün links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	0
	Gelb Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	0
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	1
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Grün Dibbesdorf	0
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	3
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Gelb Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1

Phase	Phase pro Fahrtrichtung	Dauer [s]
34	Grün Wolfsburg, Rot links, Grün Braunschweig, Rot Dibbesdorf	42
	Grün Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Grün Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Grün Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	0
	Grün Wolfsburg, Grün links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	0
	Gelb Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	0
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	1
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Grün Dibbesdorf	0
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	3
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Gelb Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
35	Grün Wolfsburg, Rot links, Grün Braunschweig, Rot Dibbesdorf	22
	Grün Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Grün Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Grün Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
	Grün Wolfsburg, Grün links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	24
	Gelb Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	1
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Grün Dibbesdorf	0
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	3
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Gelb Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
36	Grün Wolfsburg, Rot links, Grün Braunschweig, Rot Dibbesdorf	17
	Grün Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Grün Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Grün Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
	Grün Wolfsburg, Grün links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	15
	Gelb Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	1
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Grün Dibbesdorf	0
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	3
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Gelb Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1

Phase	Phase pro Fahrtrichtung	Dauer [s]
37	Grün Wolfsburg, Rot links, Grün Braunschweig, Rot Dibbesdorf	39
	Grün Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Grün Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Grün Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
	Grün Wolfsburg, Grün links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	14
	Gelb Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	1
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Grün Dibbesdorf	0
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	3
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Gelb Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
38	Grün Wolfsburg, Rot links, Grün Braunschweig, Rot Dibbesdorf	27
	Grün Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Grün Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Grün Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
	Grün Wolfsburg, Grün links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	21
	Gelb Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	1
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Grün Dibbesdorf	0
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	3
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Gelb Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
39	Grün Wolfsburg, Rot links, Grün Braunschweig, Rot Dibbesdorf	33
	Grün Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Grün Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Grün Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	0
	Grün Wolfsburg, Grün links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	0
	Gelb Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	0
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	1
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Grün Dibbesdorf	0
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	3
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Gelb Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1

Phase	Phase pro Fahrtrichtung	Dauer [s]
40	Grün Wolfsburg, Rot links, Grün Braunschweig, Rot Dibbesdorf	14
	Grün Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Grün Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Grün Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1
	Grün Wolfsburg, Grün links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	10
	Gelb Wolfsburg, Gelb links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	4
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	1
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Grün Dibbesdorf	0
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Gelb Dibbesdorf	3
	Rot Wolfsburg, Rot links, Rot Braunschweig, Rot Dibbesdorf	2
	Gelb Wolfsburg, Rot links, Gelb Braunschweig, Rot Dibbesdorf	1

06.04.2011, 7:30 Uhr bis 8:00 Uhr, Verkehrsnachfrage

Phase	Rückstau vor Grün [Fzg]	Rückstau vor Grün [Fzg]	passierte Fahrzeuge bei Grün [Fzg]
	Richtung Wolfsburg	Richtung Dibbesdorf	Richtung Wolfsburg
1	5	1	24
2	1	3	20
3	5	3	24
4	7	2	27
5	8	1	13
6	8	2	28
7	12	3	33
8	9	7	33
9	10	2	21
10	5	3	11
11	3	1	18
12	7	1	9
13	7	3	18
14	11	4	25
15	8	10	38
16	3	4	11
17	4	1	25
18	8	2	14
19	4	3	9
20	3	4	19
21	5	9	27
22	2	4	16
23	5	3	12
24	9	3	22
25	14	2	16
26	5	5	18
27	12	4	26
28	3	1	11
29	5	2	16
30	1	1	11
31	2	2	19
32	8	0	18
33	5	0	5
34	6	0	20
35	10	1	21
36	4	3	15
37	7	4	15
38	8	1	22
39	6	0	6
40	0	2	8

Phase	passierte Fahrzeuge bei Grün [Fzg]	Rückstau nach Grün [Fzg]	Rückstau nach Grün [Fzg]
	Richtung Dibbesdorf	Richtung Wolfsburg	Richtung Dibbesdorf
1	2	0	0
2	4	0	0
3	3	0	0
4	3	0	0
5	1	0	0
6	2	0	0
7	5	0	0
8	7	0	0
9	0	0	2
10	3	0	0
11	2	0	0
12	1	0	0
13	5	0	0
14	4	0	0
15	11	0	0
16	4	0	0
17	1	0	0
18	2	0	0
19	3	0	0
20	0	0	4
21	12	0	0
22	4	0	0
23	4	0	0
24	4	0	0
25	2	0	0
26	6	0	0
27	5	0	0
28	2	0	0
29	4	0	0
30	3	0	0
31	4	0	0
32	0	0	0
33	0	0	0
34	0	0	0
35	1	0	0
36	3	0	0
37	4	0	0
38	2	0	0
39	0	0	0
40	3	0	0

SUMO-Routen

```

<routes>
  <vtype id="typeWE" accel="1.5" decel="4.5" sigma="0" length="5.5" maxspeed="21"
  guiShape="passenger"/>
  <route id="1" edges="9 2 10 11" />
  <route id="2" edges="9 29 20 3d868914-5a51-4d12-86fc-eae650431f29" />
  <vehicle id="1001" type="typeWE" route="1" depart="0.0" departspeed="max" />
  <vehicle id="1002" type="typeWE" route="1" depart="0.5" departspeed="max" />
  <vehicle id="1003" type="typeWE" route="1" depart="1.0" departspeed="max" />
  <vehicle id="1004" type="typeWE" route="1" depart="1.5" departspeed="max" />
  <vehicle id="1005" type="typeWE" route="1" depart="5.0" departspeed="max" />
  <vehicle id="1006" type="typeWE" route="1" depart="43" departspeed="max" />
  <vehicle id="1007" type="typeWE" route="1" depart="46" departspeed="max" />
  <vehicle id="1008" type="typeWE" route="1" depart="59" departspeed="max" />
  <vehicle id="1009" type="typeWE" route="1" depart="60" departspeed="max" />
  <vehicle id="1010" type="typeWE" route="1" depart="62" departspeed="max" />
  <vehicle id="1011" type="typeWE" route="1" depart="66" departspeed="max" />
  <vehicle id="1012" type="typeWE" route="2" depart="68" departspeed="max" />
  <vehicle id="1013" type="typeWE" route="1" depart="70" departspeed="max" />
  <vehicle id="1014" type="typeWE" route="1" depart="76" departspeed="max" />
  <vehicle id="1015" type="typeWE" route="1" depart="77" departspeed="max" />
  <vehicle id="1016" type="typeWE" route="1" depart="79" departspeed="max" />
  <vehicle id="1017" type="typeWE" route="1" depart="80.5" departspeed="max" />
  <vehicle id="1018" type="typeWE" route="1" depart="82" departspeed="max" />
  <vehicle id="1019" type="typeWE" route="1" depart="83.5" departspeed="max" />
  <vehicle id="1020" type="typeWE" route="1" depart="86" departspeed="max" />
  <vehicle id="1021" type="typeWE" route="1" depart="87.5" departspeed="max" />
  <vehicle id="1022" type="typeWE" route="1" depart="89" departspeed="max" />
  <vehicle id="1023" type="typeWE" route="1" depart="91" departspeed="max" />
  <vehicle id="1024" type="typeWE" route="2" depart="92" departspeed="max" />
  <vehicle id="1025" type="typeWE" route="1" depart="93" departspeed="max" />
  <vehicle id="1026" type="typeWE" route="1" depart="94" departspeed="max" />
  <vehicle id="1027" type="typeWE" route="1" depart="101" departspeed="max" />
  <vehicle id="1028" type="typeWE" route="2" depart="107" departspeed="max" />
  <vehicle id="1029" type="typeWE" route="1" depart="127" departspeed="max" />
  <vehicle id="1030" type="typeWE" route="1" depart="133" departspeed="max" />
  <vehicle id="1031" type="typeWE" route="2" depart="141" departspeed="max" />
  <vehicle id="1032" type="typeWE" route="1" depart="143" departspeed="max" />
  <vehicle id="1033" type="typeWE" route="2" depart="147" departspeed="max" />
  <vehicle id="1034" type="typeWE" route="1" depart="148" departspeed="max" />
  <vehicle id="1035" type="typeWE" route="1" depart="153" departspeed="max" />
  <vehicle id="1036" type="typeWE" route="1" depart="156" departspeed="max" />
  <vehicle id="1037" type="typeWE" route="1" depart="160" departspeed="max" />
  <vehicle id="1038" type="typeWE" route="1" depart="163" departspeed="max" />
  <vehicle id="1039" type="typeWE" route="1" depart="165" departspeed="max" />
  <vehicle id="1040" type="typeWE" route="1" depart="166.5" departspeed="max" />
  <vehicle id="1041" type="typeWE" route="1" depart="169" departspeed="max" />
  <vehicle id="1042" type="typeWE" route="2" depart="174" departspeed="max" />
  <vehicle id="1043" type="typeWE" route="1" depart="176" departspeed="max" />
  <vehicle id="1044" type="typeWE" route="1" depart="177" departspeed="max" />
  <vehicle id="1045" type="typeWE" route="1" depart="179.5" departspeed="max" />
  <vehicle id="1046" type="typeWE" route="1" depart="182" departspeed="max" />
  <vehicle id="1047" type="typeWE" route="1" depart="184.5" departspeed="max" />
  <vehicle id="1048" type="typeWE" route="1" depart="186" departspeed="max" />
  <vehicle id="1049" type="typeWE" route="1" depart="187.5" departspeed="max" />

```

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

```
<vehicle id="1442" type="typeWE" route="1" depart="1674.5" departspeed="max" />
<vehicle id="1443" type="typeWE" route="1" depart="1676.5" departspeed="max" />
<vehicle id="1444" type="typeWE" route="1" depart="1682" departspeed="max" />
<vehicle id="1445" type="typeWE" route="1" depart="1684" departspeed="max" />
<vehicle id="1446" type="typeWE" route="1" depart="1686" departspeed="max" />
<vehicle id="1447" type="typeWE" route="1" depart="1688" departspeed="max" />
<vehicle id="1448" type="typeWE" route="1" depart="1696.5" departspeed="max" />
<vehicle id="1449" type="typeWE" route="1" depart="1697.5" departspeed="max" />
<vehicle id="1450" type="typeWE" route="2" depart="1704.5" departspeed="max" />
<vehicle id="1451" type="typeWE" route="1" depart="1736" departspeed="max" />
<vehicle id="1452" type="typeWE" route="1" depart="1741" departspeed="max" />
<vehicle id="1453" type="typeWE" route="1" depart="1744" departspeed="max" />
<vehicle id="1454" type="typeWE" route="1" depart="1747" departspeed="max" />
<vehicle id="1455" type="typeWE" route="1" depart="1753.5" departspeed="max" />
<vehicle id="1456" type="typeWE" route="1" depart="1755" departspeed="max" />
<vehicle id="1457" type="typeWE" route="2" depart="1756.5" departspeed="max" />
<vehicle id="1458" type="typeWE" route="1" depart="1758" departspeed="max" />
<vehicle id="1459" type="typeWE" route="2" depart="1764.5" departspeed="max" />
<vehicle id="1460" type="typeWE" route="1" depart="1767" departspeed="max" />
<vehicle id="1461" type="typeWE" route="2" depart="1777" departspeed="max" />
<vehicle id="1462" type="typeWE" route="1" depart="1789" departspeed="max" />
</routes>
```

C. Simulationsszenario Autobahn, vorausschauendes Stauassistenzsystem

Geschwindigkeitsprofile der ersten Fahrer-Fahrzeug-Einheit

Zeit [s]	Fahrt 1 [m/s]	Fahrt 2 [m/s]	Fahrt 3 [m/s]	Fahrt 4 [m/s]
1	7,00	3,94	3,40	8,01
2	7,23	4,45	3,97	8,54
3	7,53	5,24	3,96	9,07
4	7,41	5,55	4,13	9,60
5	7,31	5,42	5,46	10,11
6	7,14	5,03	6,41	10,61
7	7,43	5,19	6,50	11,09
8	7,53	6,02	6,33	11,56
9	7,50	7,07	6,04	12,00
10	7,33	7,93	5,96	12,42
11	7,16	8,10	5,91	12,82
12	6,85	8,38	6,16	13,18
13	6,47	9,33	6,26	13,52
14	6,30	9,53	6,66	13,83
15	5,66	9,55	7,42	14,10
16	4,98	9,30	7,72	14,34
17	4,78	9,17	8,45	14,55
18	4,41	8,89	9,33	14,72
19	3,98	8,52	9,29	14,85
20	3,83	8,14	9,13	14,96
21	3,85	7,90	8,86	15,03
22	5,80	7,43	8,76	15,06
23	6,08	7,38	8,17	15,07
24	6,50	7,24	6,01	15,05
25	7,47	6,83	5,57	14,99
26	7,77	6,69	5,06	14,92
27	8,24	6,07	4,16	14,81
28	8,88	5,64	3,60	14,69
29	9,26	5,43	3,02	14,55
30	9,61	5,03	2,58	14,39
31	9,86	4,42	2,20	14,21
32	10,00	3,96	1,40	14,03
33	10,23	3,69	0,89	13,84
34	10,32	3,51	0,69	13,64
35	10,34	3,50	0,41	13,44
36	10,40	3,49	0,76	13,24
37	10,37	1,98	0,29	13,04
38	10,30	1,79	0,00	12,85
39	10,19	2,20	2,52	12,66

Zeit [s]	Fahrt 1 [m/s]	Fahrt 2 [m/s]	Fahrt 3 [m/s]	Fahrt 4 [m/s]
40	9,94	3,53	3,91	12,49
41	9,87	4,41	5,17	12,33
42	9,94	5,47	4,85	12,19
43	9,87	5,64	4,64	12,06
44	9,80	5,67	4,48	11,95
45	9,85	6,20	5,09	11,86
46	9,99	6,86	5,68	11,79
47	10,02	6,97	6,23	11,74
48	9,98	7,22	6,89	11,71
49	9,66	7,62	6,92	11,71
50	9,43	7,68	6,24	11,73
51	9,08	7,45	6,00	11,77
52	8,85	7,13	5,56	11,83
53	8,81	7,04	5,02	11,91
54	8,69	6,80	4,80	12,01
55	8,91	6,31	4,58	12,12
56	9,10	5,97	4,39	12,26
57	9,28	5,55	4,50	12,40
58	9,96	5,01	4,57	12,56
59	10,27	4,83	4,10	12,73
60	10,46	4,14	1,81	12,91
61	10,41	2,73	1,41	13,09
62	10,54	1,94	1,55	13,27
63	10,78	0,91	2,89	13,45
64	10,73	0,57	6,40	13,62
65	10,67	0,79	7,75	13,79
66	10,57	1,34	7,68	13,95
67	10,72	2,56	7,63	14,10
68	10,68	3,60	6,61	14,24
69	10,56	5,32	4,61	14,35
70	10,54	6,72	3,92	14,45
71	10,68	7,21	3,49	14,52
72	10,79	7,66	3,14	14,57
73	11,09	7,42	3,03	14,59
74	11,18	7,28	2,99	14,59
75	11,54	6,65	3,96	14,55
76	12,44	5,38	4,25	14,49
77	12,94	5,15	4,72	14,39
78	12,89	5,00	5,18	14,26
79	12,46	5,22	5,31	14,10

Zeit [s]	Fahrt 1 [m/s]	Fahrt 2 [m/s]	Fahrt 3 [m/s]	Fahrt 4 [m/s]
80	12,20	5,34	5,23	13,90
81	11,73	5,55	4,68	13,68
82	10,93	5,50	4,51	13,42
83	9,71	5,28	4,19	13,13
84	7,60	4,88	3,05	12,81
85	4,62	4,41	2,64	12,46
86	3,50	4,20	2,19	12,08
87	2,51	3,88	1,54	11,68
88	1,27	3,51	1,46	11,26
89	1,21	3,22	1,30	10,82
90	1,11	2,73	0,56	10,36
91	0,53	1,53	0,33	9,88
92	0,31	1,23	0,00	9,39
93	0,07	0,83	0,00	8,90
94	0,00	0,27	0,00	8,39
95	0,00	0,11	0,00	7,89
96	0,00	0,00	0,00	7,39
97	0,00	0,00	0,00	6,89
98	0,00	0,00	0,00	6,39
99	0,00	0,00	0,00	5,91
100	0,00	0,00	0,00	5,44
101	0,00	0,00	0,00	4,99
102	0,00	0,00	0,00	4,56
103	0,00	0,00	0,00	4,15
104	0,00	0,00	0,36	3,76
105	0,00	0,52	2,44	3,40
106	0,00	1,69	2,78	3,07
107	0,00	2,27	4,07	2,77
108	0,00	3,60	4,82	2,50
109	0,00	4,91	4,89	2,27
110	0,00	5,18	4,78	2,06
111	0,00	5,19	4,96	1,90
112	0,00	4,94	5,12	1,76
113	0,00	4,45	5,48	1,67
114	0,00	3,13	6,05	1,61
115	0,00	1,98	6,25	1,58
116	0,00	1,74	6,86	1,58
117	0,00	1,10	7,72	1,62
118	0,00	0,15	7,88	1,68
119	0,00	0,00	8,03	1,78

Zeit [s]	Fahrt 1 [m/s]	Fahrt 2 [m/s]	Fahrt 3 [m/s]	Fahrt 4 [m/s]
120	0,00	0,00	8,10	1,90
121	0,00	0,00	8,13	2,05
122	0,00	0,00	8,13	2,22
123	0,00	0,00	7,68	2,41
124	0,00	0,00	7,56	2,61
125	0,00	0,00	6,95	2,84
126	0,00	0,00	6,01	3,07
127	0,00	0,00	5,82	3,31
128	0,00	0,00	4,94	3,55
129	0,00	0,00	3,84	3,80
130	0,00	0,00	3,51	4,05
131	0,00	0,00	2,61	4,30
132	0,00	0,00	1,76	4,54
133	0,00	0,00	1,59	4,77
134	0,40	0,00	1,00	4,99
135	2,67	0,00	0,13	5,20
136	4,58	0,00	0,07	5,39
137	5,19	0,00	0,00	5,56
138	6,21	0,00	0,00	5,71
139	6,75	0,00	0,00	5,85
140	7,10	0,00	0,00	5,96
141	7,88	0,00	0,00	6,05
142	8,91	0,00	0,00	6,12
143	9,10	0,00	0,00	6,16
144	9,53	0,00	0,00	6,18
145	10,04	0,00	0,00	6,17
146	10,25	0,00	0,00	6,14
147	10,74	0,00	0,00	6,09
148	11,18	0,00	0,00	6,02
149	11,17	0,00	0,00	5,93
150	11,27	0,00	0,00	5,82
151	11,39	0,00	0,00	5,69
152	11,41	0,00	0,00	5,55
153	11,58	0,00	0,00	5,40
154	11,12	0,00	0,00	5,24
155	10,71	0,00	0,00	5,07
156	9,96	0,00	0,00	4,90
157	9,34	0,00	0,00	4,72
158	9,13	0,00	0,00	4,55
159	8,69	0,00	0,00	4,37

Zeit [s]	Fahrt 1 [m/s]	Fahrt 2 [m/s]	Fahrt 3 [m/s]	Fahrt 4 [m/s]
160	7,46	0,00	0,00	4,21
161	6,71	0,00	0,00	4,05
162	5,59	0,00	0,00	3,91
163	4,16	0,00	0,00	3,78
164	3,77	0,00	0,00	3,67
165	3,37	0,00	0,00	3,58
166	2,78	0,76	0,00	3,51
167	2,62	1,16	0,00	3,46
168	2,78	1,85	0,00	3,44
169	4,01	2,95	0,00	3,44
170	4,63	3,46	0,70	3,48
171	5,82	4,65	3,96	3,54
172	7,23	6,15	4,52	3,63
173	7,77	6,51	5,63	3,75
174	8,55	7,49	7,03	3,90
175	9,24	8,68	7,30	4,09
176	9,54	8,94	8,07	4,30
177	10,06	9,38	9,47	4,54
178	10,68	9,98	9,81	4,81
179	10,98	10,08	10,51	5,11
180	11,44	10,45	11,38	5,44
181	12,04	10,98	11,50	5,78
182	12,23	11,14	11,51	6,15
183	12,50	11,03	11,08	6,54
184	12,82	10,77	10,96	6,94
185	12,99	10,67	10,69	7,36
186	13,24	10,54	10,33	7,78
187	13,49	10,37	10,28	8,22
188	13,64	10,48	10,25	8,66
189	13,79	10,48	10,58	9,10
190	13,83	10,37	10,84	9,55
191	13,82	10,42	11,52	9,98
192	13,79	10,71	11,80	10,41
193	13,66	11,10	11,68	10,83
194	13,49	11,21	11,23	11,24
195	13,29	11,24	10,71	11,62
196	12,92	10,73	10,56	11,99
197	12,73	10,59	10,27	12,34
198	12,31	10,16	10,01	12,66
199	11,85	9,64	10,05	12,96

Zeit [s]	Fahrt 1 [m/s]	Fahrt 2 [m/s]	Fahrt 3 [m/s]	Fahrt 4 [m/s]
200	11,63	9,58	10,38	13,23
201	11,33	9,42	10,86	13,46
202	11,22	9,71	10,95	13,67
203	11,52	9,89	11,23	13,84
204	12,01	10,28	11,77	13,98
205	12,31	10,99	11,93	14,08
206	12,51	11,18	12,37	14,15
207	12,54	11,45	12,11	14,18
208	12,55	11,70	11,99	14,18
209	12,52	11,73	11,67	14,14
210	12,50	11,81	11,42	14,07
211	12,52	11,88	11,35	13,97
212	12,60	11,93	11,48	13,84
213	12,73	11,85	11,66	13,68
214	12,57	11,46	11,69	13,50
215	12,54	11,40	11,88	13,29
216	12,76	11,51	12,39	13,05
217	13,31	11,63	12,49	12,80
218	13,54	11,71	12,84	12,53
219	14,21	11,83	13,27	12,25
220	15,08	11,44	13,35	11,96
221	15,31	11,22	13,21	11,66
222	15,54	11,01	12,91	11,35
223	15,69	10,81	12,77	11,04
224	15,77	10,73	12,41	10,73
225	15,89	10,65	12,41	10,43
226	16,02	10,63	12,31	10,13
227	16,03	10,64	12,10	9,84
228	16,17	10,65	11,81	9,57
229	16,37	10,88	11,72	9,31
230	16,44	10,81	11,78	9,06
231	16,36	10,79	11,84	8,84
232	15,44	10,43	11,84	8,63
233	15,17	10,31	12,10	8,45
234	14,93	10,06	12,07	8,29
235	14,20	9,61	12,15	8,16
236	13,44	9,57	12,14	8,05
237	12,19	9,26	12,12	7,97
238	11,72	8,78	12,13	7,91
239	11,60	8,69	12,04	7,88

Zeit [s]	Fahrt 1 [m/s]	Fahrt 2 [m/s]	Fahrt 3 [m/s]	Fahrt 4 [m/s]
240	11,44	8,46	11,87	7,88
241	11,36	8,38	11,92	7,90
242	11,36	8,44	12,13	7,94
243	11,30	8,57	12,28	8,00
244	10,78	8,84	12,21	8,09
245	10,69	8,91	12,19	8,20
246	10,49	9,02	12,14	8,32
247	10,79	9,19	12,18	8,46
248	10,93	9,09	12,29	8,61
249	10,94	8,76	12,53	8,77
250	10,55	8,52	12,76	8,94
251	10,24	8,59	13,00	9,11
252	9,66	8,73	12,97	9,28
253	8,63	8,28	12,92	9,46
254	7,76	8,16	12,74	9,63
255	6,33	7,99	12,79	9,79
256	5,24	7,90	13,10	9,95
257	4,93	7,85	13,28	10,09
258	4,88	7,69	13,29	10,22
259	5,95	7,80	13,30	10,33
260	6,75	7,85	13,35	10,43
261	7,76	7,98	13,42	10,50
262	8,90	8,21	13,49	10,55
263	9,38	8,38	13,51	10,57
264	10,14	8,70	13,50	10,57
265	10,98	8,31	13,53	10,55
266	11,38	8,20	13,55	10,49
267	11,86	8,04	13,60	10,40
268	12,45	8,33	13,55	10,29
269	12,72	8,36	13,07	10,15
270	13,06	8,19	12,90	9,98
271	13,44	8,23	12,44	9,78
272	13,64	8,25	11,12	9,55
273	13,77	8,29	10,94	9,30
274	13,79	8,17	10,55	9,03
275	13,81	8,10	10,60	8,73
276	13,73	8,13	11,17	8,41
277	13,76	7,82	11,70	8,07
278	13,82	7,74	11,82	7,71
279	13,83	7,44	12,09	7,35

Zeit [s]	Fahrt 1 [m/s]	Fahrt 2 [m/s]	Fahrt 3 [m/s]	Fahrt 4 [m/s]
280	13,76	7,27	12,51	6,97
281	13,73	7,27	12,61	6,58
282	13,62	7,42	12,99	6,19
283	13,51	8,20	13,51	5,79
284	13,56	9,08	13,50	5,40
285	13,45	9,65	13,48	5,01
286	13,35	9,77	13,49	4,63
287	13,28	9,86	13,46	4,26
288	13,21	10,08	13,43	3,90
289	13,03	10,19	13,31	3,56
290	12,94	10,51	13,34	3,24
291	12,96	10,80	13,54	2,93
292	12,84	10,81	13,79	2,66
293	12,65	10,84	13,97	2,41
294	12,29	10,43	14,75	2,18
295	11,76	10,28	15,78	1,99
296	11,17	10,08	15,74	1,82
297	9,69	9,79	15,35	1,69
298	8,27	9,66	14,74	1,60
299	7,80	9,55	14,68	1,53
300	7,03	8,75	14,57	1,50
301	6,37	8,58	14,74	1,51
302	6,39	8,16	14,83	1,55
303	6,76	7,47	15,15	1,62
304	8,32	7,41	15,52	1,72
305	8,93	7,19	15,53	1,86
306	9,83	6,86	15,54	2,02
307	10,70	6,69	15,72	2,22
308	10,98	6,46	15,80	2,43
309	11,40	5,56	16,00	2,68
310	11,88	5,26	15,99	2,94
311	12,01	4,39	15,94	3,22
312	12,10	3,51	15,82	3,52
313	12,19	3,37	15,66	3,84
314	12,19	3,05	15,65	4,16
315	12,11	1,81	15,57	4,49
316	12,31	1,44	15,23	4,82
317	12,37	0,83	15,09	5,16
318	12,58	0,09	14,60	5,49
319	12,50	0,00	13,58	5,82

Zeit [s]	Fahrt 1 [m/s]	Fahrt 2 [m/s]	Fahrt 3 [m/s]	Fahrt 4 [m/s]
320	12,39	0,00	13,18	6,14
321	12,23	0,00	12,00	6,45
322	12,08	0,00	10,96	6,75
323	11,93	0,00	10,90	7,03
324	11,53	0,00	10,47	7,30
325	11,04	0,00	8,86	7,54
326	10,86	0,00	8,32	7,76
327	10,68	0,00	6,83	7,96
328	10,58	0,00	5,40	8,14
329	10,48	0,00	5,29	8,28
330	10,24	0,00	5,29	8,40
331	9,75	0,00	6,41	8,50
332	9,26	0,00	6,93	8,56
333	8,26	0,00	8,18	8,60
334	7,71	0,00	9,94	8,61
335	7,53	0,00	10,95	8,60
336	7,43	0,00	11,50	8,56
337	8,08	0,00	11,61	8,49
338	8,26	0,00	11,85	8,40
339	8,00	0,00	12,15	8,30
340	7,21	0,00	12,21	8,17
341	6,62	0,00	12,53	8,02
342	5,71	0,00	12,97	7,86
343	4,79	0,00	13,08	7,69
344	4,41	0,00	13,40	7,51
345	3,85	0,00	13,91	7,32
346	2,81	0,00	14,03	7,13
347	2,32	0,00	14,16	6,94
348	1,16	0,00	14,30	6,75
349	0,74	0,00	14,27	6,56
350	0,46	0,00	14,30	6,39
351	0,10	0,00	14,40	6,22
352	0,00	0,00	14,39	6,06
353	0,00	0,00	14,39	5,92
354	0,00	0,00	14,14	5,80
355	0,00	0,00	14,04	5,70
356	0,00	0,00	13,85	5,62
357	0,00	0,00	13,45	5,56
358	0,00	0,00	13,39	5,53
359	0,00	0,00	13,13	5,53

Zeit [s]	Fahrt 1 [m/s]	Fahrt 2 [m/s]	Fahrt 3 [m/s]	Fahrt 4 [m/s]
360	0,00	0,00	12,72	5,55
361	0,00	0,00	12,76	5,60
362	0,00	0,69	12,73	5,69
363	0,08	1,90	12,58	5,79
364	1,14	2,15	12,31	5,93
365	1,27	2,82	12,11	6,10
366	1,25	4,05	11,53	6,29
367	2,15	4,38	11,13	6,51
368	2,45	5,16	10,13	6,76
369	3,36	6,18	7,94	7,03
370	3,73	6,48	7,33	7,32
371	3,68	7,28	6,86	7,63
372	4,03	8,21	7,08	7,95
373	4,73	8,36	7,47	8,30
374	5,12	8,85	8,54	8,65
375	5,93	10,40	10,07	9,02
376	7,13	10,79	10,45	9,39
377	7,59	11,43	10,96	9,76
378	8,29	12,23	10,88	10,14
379	8,38	12,38	10,81	10,51
380	8,19	12,72	10,65	10,88
381	7,92	13,17	10,73	11,24
382	8,10	13,46	10,80	11,59
383	8,33	14,66	10,99	11,92
384	8,42	16,42	11,24	12,24
385	8,66	16,29	11,26	12,53
386	8,79	16,05	11,24	12,81
387	8,59	15,59	11,48	13,06
388	8,16	15,44	11,53	13,29
389	8,10	15,27	11,73	13,48
390	8,30	15,13	11,90	13,65
391	8,79	15,17	11,89	13,79
392	8,99	15,29	11,70	13,89
393	8,88	15,57	11,39	13,97
394	8,54	15,62	11,31	14,01
395	8,51	15,73	11,17	14,02
396	8,72	15,90	10,97	13,99
397	8,93	15,90	10,93	13,94
398	8,97	15,95	10,98	13,85
399	9,01	15,63	10,86	13,74

Zeit [s]	Fahrt 1 [m/s]	Fahrt 2 [m/s]	Fahrt 3 [m/s]	Fahrt 4 [m/s]
400	9,80	15,55	10,73	13,59
401	10,12	15,50	10,28	13,42
402	10,31	15,36	8,28	13,22
403	10,26	15,27	7,96	13,01
404	10,05	15,04	7,48	12,77
405	9,74	14,03	7,22	12,51
406	8,84	13,79	7,26	12,24
407	8,31	13,24	7,62	11,95
408	7,83	12,19	9,12	11,66
409	7,40	11,89	9,53	11,36
410	7,35	11,07	10,13	11,05
411	7,28	8,80	10,20	10,75
412	5,03	8,10	10,01	10,45
413	3,87	6,27	9,53	10,15
414	2,34	5,61	8,49	9,86
415	1,64	5,56	8,13	9,58
416	1,64	5,76	6,90	9,32
417	2,48	6,88	5,20	9,07
418	4,62	7,39	4,83	8,84
419	5,34	8,54	4,20	8,64
420	6,54	9,90	3,25	8,45
421	7,29	10,15	2,98	8,29
422	7,48	10,40	2,47	8,15
423	7,41	10,96	3,59	8,05
424	6,54	11,11	4,09	7,96
425	5,80	11,53	5,11	7,91
426	5,15	12,11	6,93	7,89
427	4,58	12,25	7,30	7,89
428	4,36	12,54	8,35	7,92
429	3,99	13,35	9,79	7,98
430	3,36	13,56	10,19	8,06
431	3,25	13,88	10,85	8,17
432	3,64	14,27	11,99	8,30
433	4,97	14,30	12,24	8,46
434	5,58	14,43	12,39	8,63
435	5,59	14,30	12,10	8,82
436	4,58	14,19	11,99	9,03
437	4,00	14,05	11,83	9,25
438	3,72	14,16	11,50	9,48
439	4,03	14,20	11,42	9,71

Zeit [s]	Fahrt 1 [m/s]	Fahrt 2 [m/s]	Fahrt 3 [m/s]	Fahrt 4 [m/s]
440	4,54	14,15	11,22	9,96
441	5,15	14,03	11,17	10,20
442	5,12	13,89	11,05	10,44
443	5,12	13,81	11,12	10,67
444	5,23	13,80	11,39	10,90
445	6,55	13,84	11,48	11,12
446	7,42	13,67	11,69	11,32
447	8,89	13,60	11,50	11,51
448	10,46	13,44	11,48	11,68
449	10,90	12,33	11,66	11,83
450	11,19	11,99	12,08	11,96
451	11,37	10,91	12,19	12,07
452	11,40	10,07	12,45	12,14
453	11,39	9,88	12,61	12,19
454	11,31	9,30	12,48	12,21
455	11,21	7,69	12,21	12,20
456	11,34	7,19	11,98	12,17
457	11,98	6,81	11,88	12,10
458	12,23	6,93	10,91	12,00
459	12,37	7,15	8,72	11,87
460	12,75	7,83	8,29	11,71
461	12,81	9,02	7,18	11,52
462	13,06	10,02	5,76	11,30
463	13,09	10,43	5,47	11,06
464	13,03	10,47	4,71	10,80
465	13,01	10,47	3,64	10,51
466	12,94	10,49	3,27	10,20
467	12,96	10,48	2,19	9,88
468	12,85	10,56	0,54	9,54
469	12,44	10,81	0,34	9,18
470	12,02	10,89	0,00	8,82
471	11,27	11,09	0,00	8,45
472	9,83	11,59	0,00	8,08
473	9,43	11,88	0,00	7,71
474	8,82	12,18	0,00	7,34
475	8,08	12,36	0,00	6,97
476	7,85	12,20	0,00	6,62
477	7,00	11,91	0,00	6,27
478	5,26	11,43	0,00	5,94
479	4,53	11,19	0,00	5,62

Zeit [s]	Fahrt 1 [m/s]	Fahrt 2 [m/s]	Fahrt 3 [m/s]	Fahrt 4 [m/s]
480	3,65	10,73	0,00	5,33
481	2,52	10,18	0,00	5,05
482	1,82	10,16	0,00	4,80
483	1,18	10,50	0,00	4,57
484	0,72	10,78	0,00	4,37
485	0,56	10,71	0,00	4,20
486	0,21	10,31	0,00	4,06
487	0,00	8,86	0,00	3,94
488	0,00	8,51	0,26	3,86
489	0,00	7,75	1,95	3,81
490	0,00	7,21	2,37	3,79
491	0,00	7,19	3,55	3,80
492	0,00	7,42	4,61	3,83
493	0,00	7,91	5,17	3,90
494	0,00	8,09	5,71	3,99
495	0,00	8,47	6,54	4,11
496	0,00	8,63	7,03	4,25
497	0,00	8,58	8,24	4,41
498	0,00	8,39	9,99	4,59
499	0,00	7,87	10,52	4,79
500	0,00	7,76	11,32	5,00
501	0,00	7,33	12,35	5,23
502	0,00	5,86	12,59	5,46
503	0,00	5,38	13,29	5,70
504	0,00	3,98	14,09	5,94
505	0,00	1,96	14,24	6,18
506	0,00	1,64	14,62	6,42
507	0,00	1,22	15,17	6,65
508	0,00	0,66	15,28	6,88
509	0,00	0,53	15,41	7,09
510	0,21	0,28	15,13	7,29
511	2,25	0,00	15,04	7,47
512	2,85	0,00	14,66	7,63
513	4,46	0,00	14,39	7,77
514	6,17	0,00	14,35	7,89
515	6,33	0,00	14,19	7,99
516	6,23	0,00	13,76	8,06
517	4,61	0,00	13,62	8,10
518	4,52	0,00	13,24	8,12
519	6,24	0,00	12,79	8,10

Zeit [s]	Fahrt 1 [m/s]	Fahrt 2 [m/s]	Fahrt 3 [m/s]	Fahrt 4 [m/s]
520	10,26	0,00	12,67	8,06
521	10,66	0,00	12,30	7,99
522	10,75	0,80	11,73	7,90
523	10,79	2,12	11,70	7,77
524	10,74	2,47	11,38	7,62
525	10,76	3,49	11,37	7,45
526	11,17	5,14	11,52	7,25
527	11,33	5,94	12,03	7,03
528	11,61	6,97	12,41	6,79
529	11,79	8,60	12,47	6,53
530	11,83	8,83	12,64	6,26
531	11,84	9,44	12,95	5,98
532	11,46	10,38	13,06	5,69
533	11,35	10,58	13,04	5,38
534	11,28	11,32	13,03	5,08
535	11,50	12,37	13,03	4,78
536	11,53	12,65	13,04	4,47
537	11,70	13,26	13,06	4,18
538	11,78	13,78	13,08	3,89
539	11,79	13,67	13,10	3,61
540	11,74	13,66	13,00	3,34
541	11,39	13,30	12,91	3,10
542	11,20	13,18	12,50	2,87
543	10,69	12,94	11,97	2,66
544	9,97	12,73	11,89	2,48
545	9,79	12,84	11,64	2,32
546	9,39	13,16	11,35	2,19
547	8,36	13,51	11,26	2,09
548	8,02	13,50	11,36	2,03
549	7,11	13,46	11,47	1,99
550	5,20	13,39	11,53	1,98
551	4,70	13,38	11,60	2,01
552	3,39	13,33	11,89	2,07
553	1,56	13,01	10,76	2,16
554	1,32	12,92	9,60	2,28
555	0,94	12,54	8,74	2,44
556	0,31	12,27	7,33	2,62
557	0,15	12,19	5,64	2,84
558	0,00	12,01	4,77	3,08
559	0,00	10,31	3,82	3,34

Zeit [s]	Fahrt 1 [m/s]	Fahrt 2 [m/s]	Fahrt 3 [m/s]	Fahrt 4 [m/s]
560	0,00	9,75	2,59	3,63
561	0,44	8,01	2,19	3,94
562	2,16	5,93	1,34	4,27
563	2,91	5,09	1,25	4,61
564	4,80	3,68	1,16	4,96
565	6,69	2,18	0,93	5,33
566	7,23	1,80	0,47	5,70
567	7,82	1,06	0,25	6,07
568	8,54	0,53	0,00	6,45
569	8,81	0,37	0,00	6,82
570	9,29	0,18	0,00	7,19
571	9,79	0,00	0,00	7,55
572	9,99	0,00	0,00	7,90
573	10,36	0,00	0,00	8,23
574	10,64	0,00	0,00	8,55
575	10,64	0,00	0,00	8,85
576	10,64	0,00	0,00	9,13
577	10,78	0,00	0,00	9,38
578	11,00	0,00	0,00	9,61
579	11,31	0,00	0,00	9,82
580	11,60	0,00	0,00	10,00
581	11,73	0,00	0,00	10,15
582	11,45	0,00	0,00	10,27
583	11,26	0,26	0,00	10,36
584	11,23	0,52	0,00	10,43
585	11,12	1,63	0,00	10,46
586	10,98	3,61	0,00	10,47
587	10,86	4,19	0,00	10,45
588	10,70	4,69	0,00	10,41
589	10,58	6,13	0,00	10,34
590	10,53	6,44	0,00	10,25
591	10,37	7,31	0,00	10,13
592	9,13	9,37	0,00	10,00
593	8,83	9,98	0,00	9,85
594	8,18	11,02	0,00	9,69
595	7,43	12,01	0,00	9,52
596	7,12	12,18	0,00	9,33
597	6,50	12,56	0,00	9,14
598	5,45	12,96	0,00	8,95
599	5,15	13,04	0,00	8,76

Zeit [s]	Fahrt 1 [m/s]	Fahrt 2 [m/s]	Fahrt 3 [m/s]	Fahrt 4 [m/s]
600	5,36	13,28	0,00	8,57
601	6,93	13,24	0,00	8,39
602	7,53	13,20	0,00	8,21
603	8,09	13,08	0,00	8,05
604	8,68	12,93	0,00	7,89
605	8,93	12,87	0,00	7,76
606	9,23	12,76	0,07	7,64
607	9,80	12,72	0,89	7,54
608	10,02	12,70	5,78	7,47
609	10,34	12,60	6,54	7,42
610	10,71	12,54	8,03	7,39
611	10,65	12,51	9,37	7,39
612	10,64	12,63	9,73	7,42
613	10,72	12,94	10,33	7,47
614	10,76	13,00	11,16	7,55
615	11,01	13,11	11,43	7,66
616	11,58	13,17	11,66	7,80
617	11,78	13,07	12,07	7,96
618	11,97	12,67	12,14	8,15
619	12,20	11,84	12,34	8,36
620	12,28	11,82	12,77	8,59
621	12,36	10,27	12,88	8,85
622	12,51	6,84	13,10	9,12
623	12,52	5,89	13,44	9,41
624	12,56	4,06	13,78	9,72
625	12,62	2,15	14,17	10,04
626	12,62	1,76	14,33	10,36
627	12,64	0,74	13,89	10,69
628	12,56	0,19	13,73	11,03
629	12,63	0,08	11,90	11,36
630	12,53	0,00	9,10	11,70
631	10,98	0,00	8,46	12,02
632	10,03	0,00	7,39	12,34
633	9,25	0,00	5,76	12,65
634	9,79	0,00	5,18	12,94
635	10,23	0,00	4,14	13,21
636	11,05	0,00	2,16	13,46
637	12,05	0,00	1,61	13,69
638	12,35	0,00	0,83	13,90
639	12,87	0,00	0,00	14,07

Zeit [s]	Fahrt 1 [m/s]	Fahrt 2 [m/s]	Fahrt 3 [m/s]	Fahrt 4 [m/s]
640	13,40	0,00	0,00	14,22
641	13,50	0,00	0,00	14,34
642	13,65	0,00	0,00	14,43
643	13,86	0,00	0,00	14,48
644	13,90	0,00	0,00	14,50
645	13,99	0,00	0,00	14,48
646	14,04	0,00	0,00	14,44
647	14,07	0,00	0,00	14,35
648	14,14	0,00	0,00	14,24
649	14,16	0,00	0,00	14,09
650	14,06	0,00	0,67	13,91
651	13,67	0,00	2,81	13,70
652	13,11	0,00	3,78	13,46
653	12,46	0,00	4,97	13,19
654	10,95	0,00	6,78	12,90
655	9,43	0,00	7,18	12,58
656	9,26	0,00	5,02	12,25
657	9,03	0,00	2,78	11,90
658	8,81	0,00	2,58	11,53
659	8,83	0,00	3,59	11,16
660	9,06	0,00	5,71	10,77
661	9,22	0,00	6,35	10,38
662	9,25	0,00	7,57	9,98
663	9,13	0,00	9,61	9,59
664	8,95	1,09	10,17	9,20
665	8,85	1,95	11,20	8,82
666	8,71	3,50	12,04	8,45
667	9,23	5,50	12,25	8,08
668	9,94	6,10	12,24	7,74
669	10,98	7,00	12,38	7,41
670	12,07	8,12	12,48	7,10
671	12,48	9,32	12,74	6,82
672	13,03	10,50	12,87	6,55
673	13,70	10,73	12,95	6,32
674	13,86	11,19	13,03	6,11
675	13,63	11,47	13,00	5,92
676	13,10	11,10	13,03	5,77
677	12,87	10,96	13,05	5,64
678	12,46	11,01	13,08	5,54
679	11,90	11,03	13,14	5,48

Zeit [s]	Fahrt 1 [m/s]	Fahrt 2 [m/s]	Fahrt 3 [m/s]	Fahrt 4 [m/s]
680	11,70	11,08	13,35	5,44
681	11,49	11,06	13,74	5,42
682	11,28	11,10	13,85	5,44
683	11,19	11,28	14,18	5,48
684	11,05	11,34	14,72	5,54
685	10,93	11,46	14,78	5,62
686	10,89	11,56	14,83	5,73
687	10,80	11,56	14,78	5,85
688	10,60	11,61	14,78	5,99
689	10,43	11,58	14,76	6,14
690	10,05	11,36	14,73	6,30
691	9,49	11,12	14,67	6,47
692	9,16	10,81	14,61	6,64
693	7,71	10,75	14,51	6,81
694	5,22	10,56	14,51	6,99
695	4,56	10,16	14,62	7,16
696	3,93	9,82	15,19	7,32
697	3,51	8,91	15,27	7,48
698	3,24	7,78	15,28	7,62
699	1,89	7,02	14,89	7,75
700	0,55	5,96	14,76	7,86
701	0,25	4,69	14,46	7,96
702	0,00	4,17	13,88	8,03
703	0,00	3,31	13,74	8,09
704	0,00	1,34	13,44	8,12
705	0,00	0,81	12,89	8,12
706	0,00	0,37	12,82	8,10
707	0,00	0,00	12,51	8,06
708	0,00	0,00	12,22	7,99
709	0,00	0,00	12,20	7,89
710	0,00	0,00	12,18	7,77
711	0,00	0,00	12,46	7,62
712	0,00	0,00	12,58	7,45
713	0,00	0,00	12,88	7,25
714	0,00	0,00	13,27	7,04
715	0,00	0,00	13,32	6,80
716	0,00	0,00	13,60	6,55
717	0,00	0,00	14,10	6,28
718	0,00	0,00	14,19	6,00
719	0,00	0,35	14,45	5,70

Zeit [s]	Fahrt 1 [m/s]	Fahrt 2 [m/s]	Fahrt 3 [m/s]	Fahrt 4 [m/s]
720	0,00	0,57	14,48	5,40
721	0,00	1,15	14,36	5,10
722	0,00	2,58	14,26	4,79
723	0,00	3,11	14,03	4,48
724	0,00	4,56	13,78	4,17
725	0,00	7,06	13,75	3,88
726	0,20	7,69	13,74	3,59
727	1,93	8,81	13,78	3,31
728	2,87	9,79	13,65	3,05
729	4,39	9,90	13,67	2,81
730	6,07	10,83	13,68	2,59
731	6,64	11,08	13,58	2,39
732	7,54	11,50	13,43	2,22
733	8,55	11,98	12,92	2,08
734	8,98	11,99	11,97	1,97
735	9,68	12,13	11,85	1,88
736	10,56	12,31	11,65	1,83
737	10,88	12,35	11,71	1,82
738	11,16	12,46	11,84	1,84
739	11,52	12,95	12,01	1,89
740	11,72	13,03	12,51	1,98
741	11,90	12,76	12,63	2,10
742	12,09	12,34	13,04	2,25
743	12,21	12,23	13,75	2,44
744	12,53	11,83	13,88	2,67
745	12,55	11,04	13,89	2,92
746	12,39	10,89	13,82	3,20
747	12,11	10,36	13,76	3,52
748	11,93	9,31	13,68	3,85
749	11,79	9,10	13,64	4,21
750	11,59	8,78	13,62	4,59
751	11,39	8,57	13,60	4,99
752	11,31	8,51	13,43	5,40
753	11,16	7,69	13,31	5,83
754	10,98	5,50	12,93	6,26
755	10,91	5,19	12,54	6,70
756	10,92	4,61	12,44	7,15
757	10,33	4,49	12,22	7,59
758	9,26	4,81	11,41	8,03
759	7,46	5,89	11,19	8,46

Zeit [s]	Fahrt 1 [m/s]	Fahrt 2 [m/s]	Fahrt 3 [m/s]	Fahrt 4 [m/s]
760	6,61	7,40	10,03	8,88
761	6,51	7,75	8,06	9,29
762	6,54	8,14	7,94	9,68
763	6,45	8,62	7,69	10,06
764	6,33	8,77	8,42	10,42
765	6,21	9,25	8,38	10,75
766	4,91	10,19	8,30	11,06
767	4,05	10,34	6,01	11,34
768	3,19	10,62	4,88	11,60
769	3,06	8,24	1,46	11,82
770	3,91	7,38	0,34	12,02
771	5,61	5,78	0,18	12,18
772	7,56	4,96	0,64	12,32
773	8,12	4,87	2,39	12,43
774	8,91	5,37	2,64	12,50
775	9,38	7,31	4,44	12,55
776	9,43	7,77	7,46	12,56
777	9,53	8,90	7,98	12,55
778	9,87	10,30	9,06	12,52
779	10,09	10,66	9,67	12,46
780	10,37	11,41	9,57	12,37
781	10,78	12,37	9,35	12,27
782	10,85	12,53	8,96	12,15
783	11,00	12,80	8,91	12,01
784	10,86	13,19	8,80	11,86
785	10,73	13,25	8,67	11,70
786	10,56	13,48	8,85	11,53
787	10,03	13,71	9,39	11,36
788	9,45	13,71	10,21	11,18
789	8,39	13,10	10,39	11,00
790	7,42	9,37	10,73	10,83
791	7,40	8,43	10,67	10,67
792	7,42	6,15	10,49	10,51
793	8,29	4,08	10,24	10,36
794	8,54	3,67	9,12	10,23
795	8,80	2,52	8,90	10,12
796	9,31	0,94	8,80	10,02
797	9,45	0,83	8,79	9,94
798	9,25	0,50	8,85	9,88
799	9,39	0,07	9,41	9,84

Zeit [s]	Fahrt 1 [m/s]	Fahrt 2 [m/s]	Fahrt 3 [m/s]	Fahrt 4 [m/s]
800	9,59	0,00	9,97	9,82
801	10,00	0,00	10,04	9,83
802	9,98	0,00	10,04	9,86
803	9,94	0,00	9,93	9,92
804	9,75	0,00	10,03	10,00
805	9,48	0,00	10,42	10,10
806	9,41	0,00	10,61	10,22
807	9,15	0,00	10,56	10,37
808	7,94	0,00	10,55	10,53
809	7,66	0,00	8,95	10,72
810	8,13	0,00	8,57	10,92
811	9,10	0,00	8,41	11,13
812	9,51	0,00	9,08	11,36
813	10,06	0,00	9,15	11,60
814	10,38	0,00	9,68	11,84
815	10,44	0,00	10,47	12,09
816	10,28	0,00	10,63	12,34
817	10,08	0,00	11,00	12,58
818	10,04	0,00	11,50	12,83
819	10,15	0,00	11,61	13,06
820	10,21	0,00	11,88	13,29
821	10,17	0,00	12,28	13,50
822	10,08	0,00	12,41	13,70
823	9,78	0,00	12,58	13,88
824	9,56	0,00	12,04	14,04
825	8,97	0,00	11,90	14,17
826	7,84	0,00	11,64	14,28
827	7,20	0,00	11,31	14,36
828	6,00	0,00	11,22	14,41
829	4,79	0,00	11,12	14,43
830	4,47	0,00	10,84	14,41
831	3,81	0,00	10,74	14,36
832	2,26	0,00	10,52	14,28
833	1,86	0,00	8,98	14,16
834	1,34	0,00	8,42	14,01
835	0,71	1,34	7,29	13,83
836	0,48	2,27	5,92	13,61
837	0,14	4,41	5,78	13,35
838	0,00	7,78	5,52	13,06
839	0,00	8,40	7,36	12,75

Zeit [s]	Fahrt 1 [m/s]	Fahrt 2 [m/s]	Fahrt 3 [m/s]	Fahrt 4 [m/s]
840	0,00	9,76	7,94	12,40
841	0,00	11,78	9,26	12,02
842	0,00	12,32	11,00	11,62
843	0,00	13,27	11,43	11,20
844	0,13	14,53	12,08	10,76
845	0,32	14,48	13,13	10,29
846	0,69	14,35	13,36	9,82
847	1,76	14,03	13,50	9,33
848	2,02	13,93	12,94	8,83
849	2,52	13,72	12,79	8,33
850	4,47	13,39	12,60	7,83
851	5,14	13,46	12,34	7,32
852	6,17	13,72	12,27	6,82
853	6,90	14,38	12,23	6,33
854	6,82	14,54	12,18	5,85
855	6,28	14,62	12,15	5,38
856	5,83	14,19	12,16	4,93
857	5,63	14,09	12,11	4,50
858	5,64	13,88	12,07	4,09
859	6,49	13,28	12,31	3,70
860	7,14	13,16	12,47	3,34
861	8,31	12,83	12,68	3,01
862	8,61	11,13	12,89	2,71
863	8,54	10,52	12,85	2,43
864	8,88	8,89	12,78	2,19
865	10,66	6,35	12,62	1,98
866	11,21	5,70	12,47	1,81
867	11,88	4,10	12,31	1,66
868	12,77	2,62	11,80	1,55
869	12,79	2,33	11,58	1,47
870	12,58	1,54	11,06	1,43
871	12,33	0,88	9,68	1,41
872	12,30	0,78	9,44	1,42
873	12,49	0,56	8,71	1,46
874	13,08	0,00	8,17	1,52
875	13,22	0,00	8,13	1,60
876	13,16	0,00	8,02	1,71
877	13,05	0,00	8,82	1,84
878	13,04	0,00	9,08	1,98
879	13,03	0,00	9,91	2,14

Zeit [s]	Fahrt 1 [m/s]	Fahrt 2 [m/s]	Fahrt 3 [m/s]	Fahrt 4 [m/s]
880	13,01	0,23	10,68	2,30
881	12,99	0,69	10,78	2,48
882	13,01	1,83	11,07	2,65
883	12,93	3,31	11,31	2,84
884	12,93	4,16	11,21	3,02
885	12,93	5,33	10,99	3,19
886	12,60	6,63	10,44	3,36
887	12,49	7,03	10,33	3,53
888	12,02	7,82	10,22	3,68
889	11,50	8,98	10,18	3,82
890	11,30	9,47	10,22	3,94
891	10,91	10,21	10,48	4,05
892	10,44	11,34	10,93	4,14
893	10,14	11,80	11,09	4,21
894	9,51	12,42	11,39	4,26
895	9,04	12,43	11,12	4,29
896	8,98	12,48	10,91	4,29
897	8,79	12,71	10,91	4,28
898	8,59	12,97	10,91	4,24
899	8,44	13,08	10,91	4,18
900	8,33	13,22	10,91	4,09

SUMO-Routen

```
<routes>
  <vtype id="typePKW" accel="2.0" decel="3.0" sigma="0.5" length="5" maxspeed="25"
    guiShape="pkw"/>
  <route id="down" edges="1 2 3" />
  <vehicle id="1001" type="typePKW" route="down" depart="10" departspeed="max" />
  <vehicle id="1002" type="typePKW" route="down" depart="25" departspeed="max" />
  <vehicle id="1003" type="typePKW" route="down" depart="40" departspeed="max" />
  <vehicle id="1004" type="typePKW" route="down" depart="55" departspeed="max" />
  <vehicle id="1005" type="typePKW" route="down" depart="70" departspeed="max" />
  <vehicle id="1006" type="typePKW" route="down" depart="85" departspeed="max" />
  <vehicle id="1007" type="typePKW" route="down" depart="100" departspeed="max" />
  <vehicle id="1008" type="typePKW" route="down" depart="115" departspeed="max" />
  <vehicle id="1009" type="typePKW" route="down" depart="130" departspeed="max" />
  <vehicle id="1010" type="typePKW" route="down" depart="145" departspeed="max" />
</routes>
```